

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

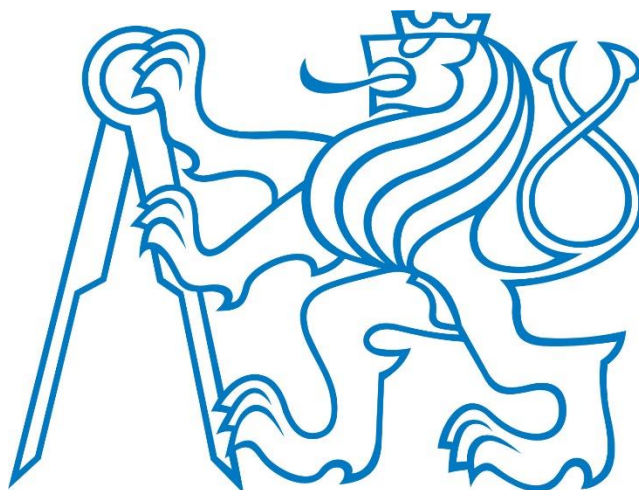
Fakulta elektrotechnická

Diplomová práce

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



Diplomová práce

System pro měření a řízení spotřeby
domácnosti s fotovoltaickými články

Autor práce: Jan Pistulka

Vedoucí práce: Ing. Jakub Svatoš

Rok obhajoby: 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne

.....

podpis



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jan Pistulka**

Program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **System pro měření a řízení spotřeby domácnosti s fotovoltaickými články**

Název tématu anglicky: **System for Measurement and Control of Household with Photovoltaic Cells**

Pokyny pro vypracování:

Nastudujte současný stav použití fotovoltaických článků v domácnostech. Na základě těchto znalostí navrhnete a realizujete systém měření spotřeby domácnosti s fotovoltaickými články. Systém bude realizovat řízení ohřevu vody (bojler) s možností případného dalšího rozšíření o elektrické topení pro domácnost s fotovoltaickými články. Řízení bude prováděno pomocí SSR relé tak, aby se co nejvíce vyráběné energie spotřebovávalo v domě a do rozvodné sítě se předávala co nejmenší část vyrobené energie.

Seznam odborné literatury:

- [1] Skalický, P.: Mikroprocesory řady 8051, BEN, Praha 2002.
- [2] Libra, M., Poulek, V.: Fotovoltaika, BEN, Praha 2009.
- [3] Vedral, J., Fischer, J.: Elektronické obvody pro měřicí techniku, ČVUT, Praha 1999.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Svatoš

Datum zadání diplomové práce: 27. září 2013

Platnost zadání do¹: 23. ledna 2015

Prof. Ing. Vladimír Haasz, CSc.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 27. 9. 2013

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Abstrakt

V této práci je uveden stručný úvod do problematiky fotovoltaických systémů. V první, teoretické, části je popsáno základní zapojení solárních článků, je uvedeno jejich dělení podle struktury a výroby, jsou uvedeny druhy použitelných střídačů a vypsány jejich výhody a nevýhody. Protože fotovoltaika byla především v posledních několika letech otázkou finanční, je uveden vývoj výkupních cen a také zhodnocení České republiky pro umístění solární elektrárny.

Hlavní, praktickou, náplní této diplomové práce je návrh a realizace měření a řízení spotřeby pomocí SSR a jedna kapitola je těmto relé věnována. Uvedeny jsou jejich důležité vlastnosti a parametry.

V posledních dvou kapitolách je již rozepsán vlastní návrh - od hardwarového návrhu přes výpočet chladiče pro SSR až k jeho výslednému ověření pomocí termokamery. Poté je uveden rozbor softwarového řešení od kalibrace měřicích čipů až po hlavní řídicí smyčku.

Na závěr se práce zabývá možným rozšířením navrhovaného systému.

Abstract

This master thesis gives a short introduction to the topic photovoltaic systems. It is described the basic connection of solar cells, stated the distribution according to structure and production and are mentioned types of inverters with description of theirs advantages and disadvantages. Due to financial aspect of photovoltaics during the last few years it's inducted a progression in prices and also Czech Republic is evaluated as a location for placing a solar power station.

Main goal of this thesis is focused on design and implementation of measurement and controlling power consumption using SSR. One chapter is devoted to this topic with description of main parameters.

In the last two chapters is described an own design – from hardware to software solution with calculations needed for designing a cooler system with testing it using thermal imager. After the above is described the software part with calibration of chips and main calibration flow.

Finally, the work deals with the possible extension of the system.

Poděkování

Zde bych rád poděkoval Ing. Jakubu Svatošovi za vedení práce a cenné rady. Děkuji také své rodině za podporu, kterou mi během psaní poskytla.

Obsah

Obsah	1
Seznam použitých zkratk	4
1. Fotovoltaika.....	5
1.1. Úvod.....	5
1.2. Zapojení fotovoltaické elektrárny (FVE).....	5
1.3. Solární článek.....	5
1.3.1. Monokrystalické články.....	6
1.3.2. Polykrystalické články.....	6
1.3.3. Tenkovrstvé články.....	7
1.4. Střídače.....	7
1.4.1. Konstrukce.....	7
1.5. Cenová politika a výhodnost.....	8
1.6. Poloha České republiky vzhledem ke slunečnímu svitu	9
1.7. Statistické údaje o výkonu v České republice.....	11
1.8. Budoucnost	13
1.8.1. Mikroformní křemík pro fotovoltaické panely	14
1.8.2. Nové tvary	14
2. SSR (<i>Solid State Relay</i>) – úvod do problematiky.....	16
2.1. Základní parametry polovodičových relé	18
2.2. Druhy spínání	18
2.2.1. „Okamžité“ / asynchronní spínání.....	18
2.2.2. Spínání v nule / synchronní spínání	19
2.3. Vazby mezi vstupem a výstupem	20
2.4. Vyzářené teplo.....	20
2.5. Spojování SSR	21
2.6. Použití	21
3. Návrh řídicí jednotky odběru	22
3.1. Měření	22
3.2. Mikroprocesor.....	23
3.3. SD karta, RTC, NRF24I01	23
3.4. Relé, SSR.....	23
3.5. Napájení.....	24
4. Rozbor řešení	25
4.1. Napájení.....	25
4.2. Mikroprocesor.....	25

4.3.	Rozhraní USB.....	26
4.4.	Měření	27
4.5.	RTC.....	29
4.6.	SD karta	29
4.7.	Řízení	30
4.8.	SSR.....	30
4.9.	Relé	31
4.10.	LED	31
4.11.	JTAG a PDI	31
5.	Návrh chladiče pro SSR relé.....	32
5.1.	SSR relé KSD215AC3.....	32
5.2.	Ověření návrhu chladiče.....	35
6.	Úpravy schématu a DPS pro zlepšení vedení a spolehlivost	37
6.1.	Návrh z hlediska vyzařování.....	37
6.2.	Diferenční páry	37
6.3.	Chlazení stabilizátoru	38
6.4.	Měděné plochy pro vyšší proudy	38
6.5.	Ochrana SSR relé	39
6.6.	Zvětšení ploch kolem krystalů	39
6.7.	Prokovy pro RTC a SD kartu	40
7.	Software.....	41
7.1.	Kalibrace měřicích čipů	41
7.1.1.	Kalibrace zesílení	41
7.1.2.	AC offset kalibrace	42
7.1.3.	DC offset kalibrace	42
7.1.4.	Výkonová kompenzace.....	42
7.1.5.	Fázová kompenzace	42
7.1.6.	Příklad čtení registru CS5490.....	43
7.2.	Hlavní program.....	44
8.	Vývojové diagramy.....	46
9.	Výsledek práce	51
10.	Rozšíření návrhu.....	53
10.1.	Vytvoření konfiguračního programu.....	53
10.2.	Přidání externího SSR.....	53
10.3.	Rozšíření pomocí bezdrátového rozhraní 2.4 GHz.....	53
10.3.1.	Řízení spínání zásuvky.....	54
10.3.2.	Monitoring a ovládání systému	54

10.3.3. Dálkový přístup k systému pro PC.....	55
10.4. Využití vnitřního rozhraní UART	55
11. Závěr.....	56
12. Seznam použité literatury.....	57
13. Přílohy.....	59
14. Seznam obrázků	72
15. Seznam tabulek	74
16. Popis příloh na DVD.....	75

Seznam použitých zkratek

A/D	Analog/Digital
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
DPS	Deska Plošných Spojů
FMPLL	Frequency-Modulated Phase-Locked Loop
FV	FotoVoltaika
FVE	FotoVoltaická Elektrárna
PC	Personal Computer
PWM	Pulse Width Modulation
RTC	Real Time Clock
SD	Secure Digital
SSR	Solid State Relay
UART	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	Universal Serial Bus

1. Fotovoltaika

1.1. Úvod

Výroba solární energie je považována za jeden z nejčistších způsobů výroby elektrické energie. Při svém fungování nevypouští žádné škodlivé plyny, neprodukuje hluk, a tak se považuje za čistou. Význam slova fotovoltaika pochází z řečtiny a je to spojení slov světlo a volt.

Jedná se o technologii, která umožňuje přeměnu slunečních paprsků dopadajících na fotovoltaický článek na energii elektrickou za využití fotovoltaického jevu. Při dopadu slunečního záření (fotonů) dochází k uvolňování a následnému hromadění volných elektronů, které po připojení elektrod vytvářejí stejnosměrný proud. Aby tento proud byl co největší, seskupují se jednotlivé články do celků (panelů) o různých velikostech a výkonech. Protože panely vyrábějí stejnosměrný proud, je nutné tento proud přeměnit na střídavý s požadovanými parametry (230 V / 400 V, 50 Hz) za použití střídačů, které budou popsány následně.

Historický objev učinil fyzik Alexandre Edmond Becquerel v roce 1839, kdy v laboratořích Bell vyrobil první solární článek. Jeho účinnost však byla pouze 10 %. Protože výroba byla náročná, efektivita nízká a cena vysoká, první systém pro výrobu elektrické energie ze slunce byl vybudován až koncem 80. let 20. století v USA.

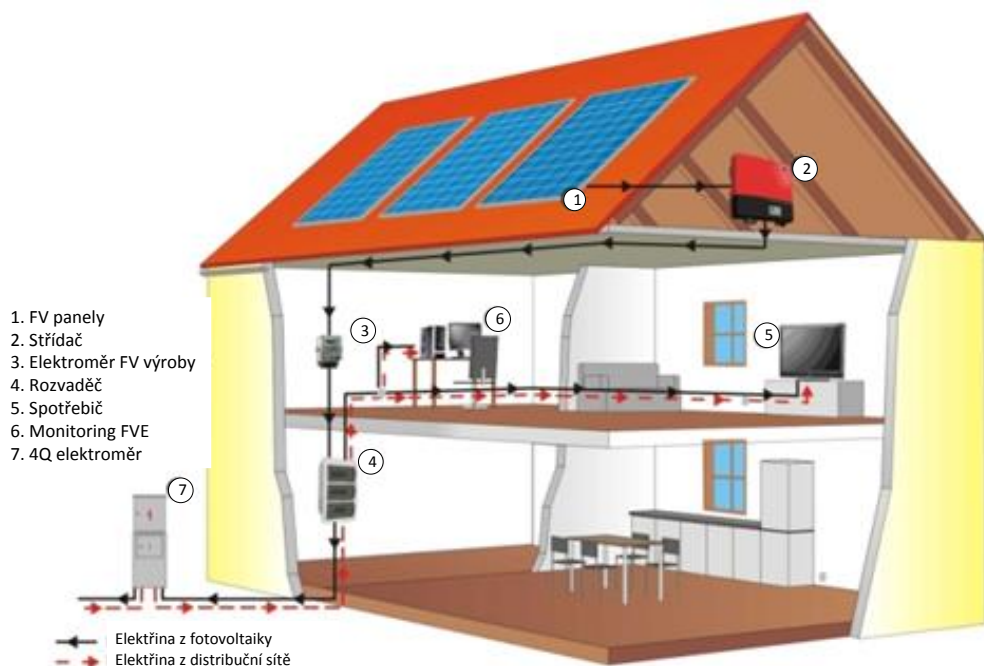
Základním kamenem vývoje fotovoltaických článků je jejich účinnost. Současné panely se pohybují na hranici pod 20 %, v laboratorních podmínkách s monokrystalickými články je to až 25 % a při výrobě nanotechnologií je plánována efektivita okolo 35 %.

1.2. Zapojení fotovoltaické elektrárny (FVE)

Příklad zapojení solárních článků na rodinném domě je na Obr. 1. Stejnosměrný proud, který je vyráběn solárními články (1), je přiveden do střídače (2), který jej přemění na 230 V / 50 Hz. Odtud již střídavé napětí vede do elektroměru (3) a do rozvaděče (4). Z rozvaděče jsou již napájeny všechny elektrické spotřebiče v domácnosti (5). Součástí systému může být také zařízení pro monitorování samotné FVE (6). Celý dům je pak do rozvodné soustavy zapojen pomocí čtyřkvadrantového elektroměru (7).

1.3. Solární článek

V následujících třech odstavcích jsou popsány tři základní druhy fotovoltaických článků z hlediska své struktury.



Obr. 1 - Příklad zapojení FVE na rodinném domě¹

1.3.1. Monokrystalické články

Jak již samotný název napovídá, tento typ se skládá pouze z jediného krystalu často čtvercového tvaru s délkou hrany 10 cm, 12,5 cm a 15 cm. Protože je článek složen z jednoho krystalu, je povrch homogenní (tmavě modrý až černý). Účinnost článků je přes 21 %.

Výrobní proces začíná roztavením zárodku krystalu z vysoce čisté křemíkové taveniny (roztavené na 1420 °C) a při pomalém otáčení se vytahováním kulaté monokrystalické tyče až do průměru 30 cm a několika metrů délky. Krystalizace je energeticky nejnáročnější proces ve fotovoltaice. Poté se vyřezou požadované tvary a napaří se tenká vrstva dotovaná difuzí fosforu. Zbývá již jen přidat zadní kontaktní vrstvu a antireflexní vrstvy a solární články jsou hotové. Během vývoje se vyzkoušely různé struktury, které slouží pro pohlcování světla – například různé rýhy vytvářené laserem.

1.3.2. Polykrystalické články

Monokrystalové články jsou snadno poznatelné podle různě se třpytící krystalické struktury, obvykle jsou opět čtvercové s rozměry od 10 cm do 21 cm. Běžná účinnost se pohybuje mezi 13 až 18 procenty.

Polykrystalický křemík se vyrábí mnohem jednodušeji a levněji než monokrystalický – většinou formou blokového lití. Po zahřátí křemíku ve vakuu na teplotu 1500 °C se regulovaně ochlazuje až na bod tání v grafitovém kelímku.

¹ Solární systém. *Zapojení fotovoltaické elektrárny* [online]. 2009 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.solarni-system.cz/fotovoltaika/zjednodusene-schema-zapojeni-fotovoltaicke-elektrarny-v-rodinnem-dome>

Takto vzniklé bloky se rozřežou na tyče a pak na vlastní destičky. Další výhodou je, že odpadu při řezání je mnohem méně.

1.3.3. Tenkovrstvé články

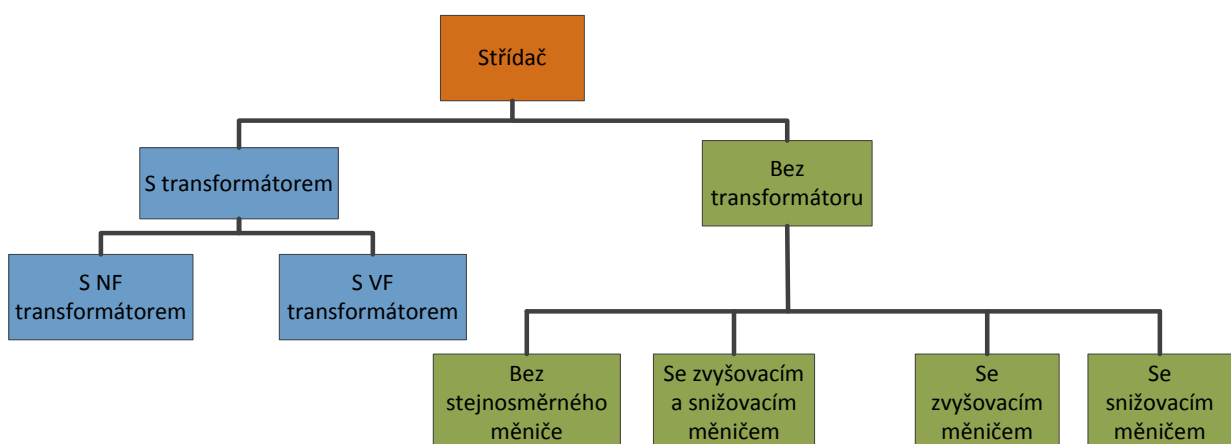
Tlak na snižování výrobních nákladů vedl k výrobě tenkovrstvých článků. Tato technologie má velký potenciál, protože má krátkou návratnost a disponuje mnohými vlastnostmi, které poly- a monokrystalické články nemají, např. menší citlivostí na teplotu a zastínění, flexibilitou, lepším využitím světelného spektra, možnou průhledností, homogenním vzhledem.

1.4. Střídače

Střídač je zařízení, které umožňuje spojení solárního článku a rozvodné sítě, popřípadě spotřebiče. Převádí stejnosměrný proud (DC – *Direct Current*) vyrobený fotovoltaickým článkem na proud střídavý (AC - *Alternating Current*) s požadavkem na přizpůsobení velikosti napětí a frekvence sítě. Aby střídač dodával do rozvodné sítě maximální možný výkon, je požadavek, aby pracoval v bodě maximálního výkonu solárního článku. Protože se v čase mění množství dopadajícího záření na solární kolektor, mění se i dodávaný výkon. Regulátor maximálního výkonu ve střídači vyrovnává pracovní přizpůsobení napětí solárního generátoru. Mnoho střídačů již umožňuje dohled nad FV (FotoVoltaickým) zařízením a zaznamenávání provozních dat – buďto na displej, nebo pomocí PC (*Personal Computer*). Ve většině je také zabudována přepěťová ochrana, ochrana proti přepólování a přetížení.

1.4.1. Konstrukce

Základní dělení střídačů je na samostatně řízené a řízené sítí. Střídače řízené sítí odvozují ze sítě napětí zapínací a vypínací impulzy, které jsou přivedeny na výkonové spínače spínající proud na frekvenci 50 Hz. Tímto vznikne obdélníkový průběh posunutý vůči frekvenci sítě (aby nedocházelo k rušení sítě, používají se elektronické filtry).



Obr. 2 - Rozdělení střídačů

Obr. 2 znázorňuje rozdělení střídačů. Každý typ má své výhody a nevýhody, uvedeny budou pouze pro představu.

- S transformátorem
výhody: ochrana galvanickým oddělením, snížení elektromagnetického rušení, možnost ochranného malého napětí
nevýhody: ztráty transformátoru, vyšší hmotnost, větší rozměry skříně, vyšší hlučnost
- Bez transformátoru
výhody: vyšší účinnost, nižší hmotnost, menší rozměry
nevýhody: nutné ochranné zařízení (pro odpojení od sítě v případě výpadku), nutné stínění dílů pod napětím, vyšší elektromagnetické vyzařování

1.5. Cenová politika a výhodnost

K celkovému masivnímu rozšíření obnovitelných zdrojů došlo kolem roku 2009. Bylo to dáno především díky dotacím a výkupním cenám vyrobené elektřiny, což zapříčinil fakt, že se Česká republika zavázala zvýšit podíl obnovitelných zdrojů na 8 % do roku 2010 a na 20 % do roku 2030. Tento závazek vyplývá z koncepce Evropské unie, která chce snižovat závislost na dovozu energetických surovin. Právě v roce 2030 by dovoz již měl dosahovat 70 %.

Tab. 1 uvádí výkupní ceny vyrobené elektrické energie z fotovoltaických elektráren pro rok 2013. Již při pohledu na částky v pravém sloupci je jasné, že výkupní ceny a zelené bonusy každým rokem rapidně klesají.

Tab. 1 - Výkupní ceny a zelené bonusy FVE²

Datum uvedení výroby do provozu		Instalovaný výkon výroby (kW)		Jednotarifní pásmo provozování	
od (včetně)	do (včetně)	od	do (včetně)	Výkupní ceny (Kč/MWh)	Zelené bonusy (Kč/MWh)
-	31.12.2005	-	-	7 273	6 343
1.1.2006	31.12.2007	-	-	15 260	14 330
1.1.2008	31.12.2008	-	-	14 882	13 952
1.1.2009	31.12.2009	0	30	13 964	13 414
1.1.2009	31.12.2009	30	-	13 862	12 932
1.1.2010	31.12.2010	0	30	13 005	12 455
1.1.2010	31.12.2010	30	-	12 903	11 973
1.1.2011	31.12.2011	0	30	7 803	7 253
1.1.2011	31.12.2011	30	100	6 141	5 211
1.1.2011	31.12.2011	100	-	5 723	4 793
1.1.2012	31.12.2012	0	30	6 284	5 734
1.1.2013	30.6.2013	0	5	3 410	2 860
1.1.2013	30.6.2013	5	30	2 830	2 280
1.7.2013	31.12.2013	0	5	2 990	2 440
1.7.2013	31.12.2013	5	30	2 430	1 880

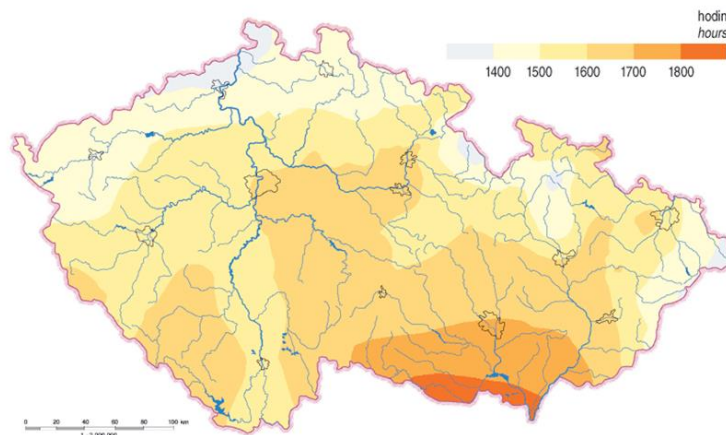
² Silektro. Výkupní ceny FVE pro rok 2013 [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.silektro.cz/aktuality/vykupni-ceny-fve-pro-rok-2013-49>

Tato tabulka pouze reflektuje situaci, jakou nastolily zákony. Původní idea byla, aby si každý vyrobil elektřinu pro svou potřebu a přebytky dodával do rozvodné sítě, čímž by se snížila jeho „závislost“ na dodávkách elektrické energie, výsledkem by také bylo nižší zatížení rozvodné sítě. Po zavedení zelených bonusů se však z této idey stal lukrativní byznys a začala se vytvářet velká solární „pole“. Protože se navíc stát zavázal cenu garantovat po určité období, je současná ekonomika kvůli smluvním cenám za výkup spíše zatížena.

1.6. Poloha České republiky vzhledem ke slunečnímu svitu

Přestože Česká republika leží na severní polokouli, prakticky ve středu Evropy, kde sluneční záření nemá takové účinky jako v rovníkové oblasti, je i „u nás“ možné vyrábět elektrickou energii přeměnou ze slunečního záření.

Z faktorů, které ovlivňují celkovou dopadající sluneční energii, jsou významné především zeměpisná poloha, orientace samotného fotovoltaického systému ke slunci, s polohou související celková doba slunečního svitu, dále pak nadmořská výška, ale také čistota ovzduší, která ovlivňuje prostupnost atmosféry pro sluneční paprsky.



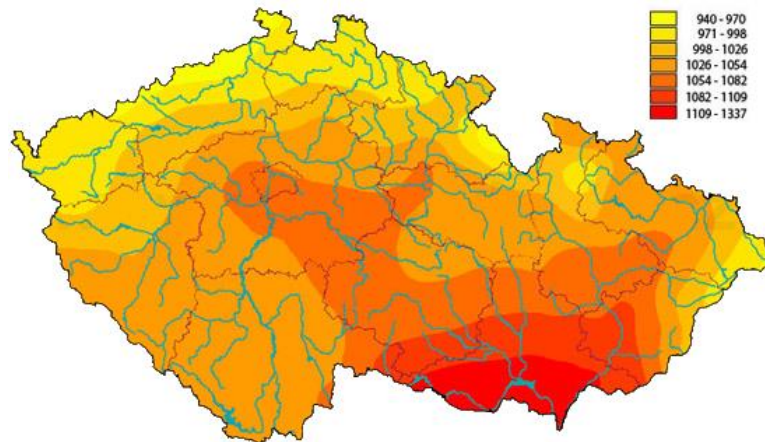
Obr. 3 – Mapa trvání slunečního svitu v ČR³

Vezmeme-li v úvahu všechny výše popsané aspekty, je poloha České republiky pro využití solární energie vcelku dobrá. Při zanedbání oblačnosti je doba slunečního svitu průměrně od 1 400 do 1 700 hodin za rok, nejvíce pak na jižní Moravě (až 2 000 hodin za rok) a nejméně na severní hranici (okolo 1 200 hodin za rok). Podrobnější hodnoty pro jednotlivé části republiky jsou patrné na Obr. 3, který znázorňuje oblasti a jejich průměrnou hodnotu trvání slunečního svitu.

Pro zhodnocení energetické bilance solárního systému je důležitá hodnota ročního úhrnu globálního slunečního záření v dané lokalitě. Za předpokladu znalosti dopadu slunečního záření na metr čtvereční a účinnosti

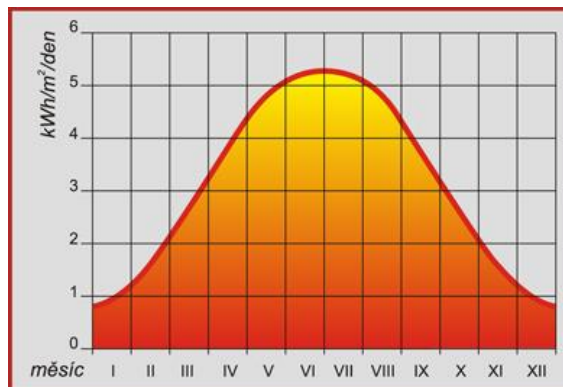
³ Isofenenergy. *Fotovoltaika v podmínkách České republiky* [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>

fotovoltaického panelu (přibližně 14 procent) jsme schopni vyrobit z této plochy přibližně 133 až 188 kWh elektrické energie ročně. Průměrný roční úhrn globálního slunečního záření v České republice je ukázán na Obr. 4.



Obr. 4 - Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR (W/m²)⁴

Mapa na Obr. 4 může pohled ještě více zjednodušit. Výsledkem je zprůměrování v závislosti na měsíci v roce a graf na Obr. 5. Ten má tvar normálního rozložení s maximální hodnotou okolo 5,25 kWh/m² za den v červnu a poté se svažuje na obě strany pololetí až k hodnotám 0,8 kWh/m² za den na přelomu roku. Z toho tedy vyplývá, že vzhledem k poloze ČR dopadne na jeden metr čtvereční největší část sluneční energie (asi 75 %) v letním období.



Obr. 5 - Průměrný roční úhrn slunečního záření pro jednotlivé měsíce⁵

Pro úplný přehled je na Obr. 6 ukázán vliv oblačnosti na sluneční záření. Při zcela jasné obloze a lokalitě, kde dopadá 1000 W/m², bude dopadat při oblačnosti již jen méně než dvě třetiny slunečního záření oproti jasnému počasí, při zatažené obloze pouze méně než jedna třetina a při inverzi přibližně jedna desetina celkové energie.

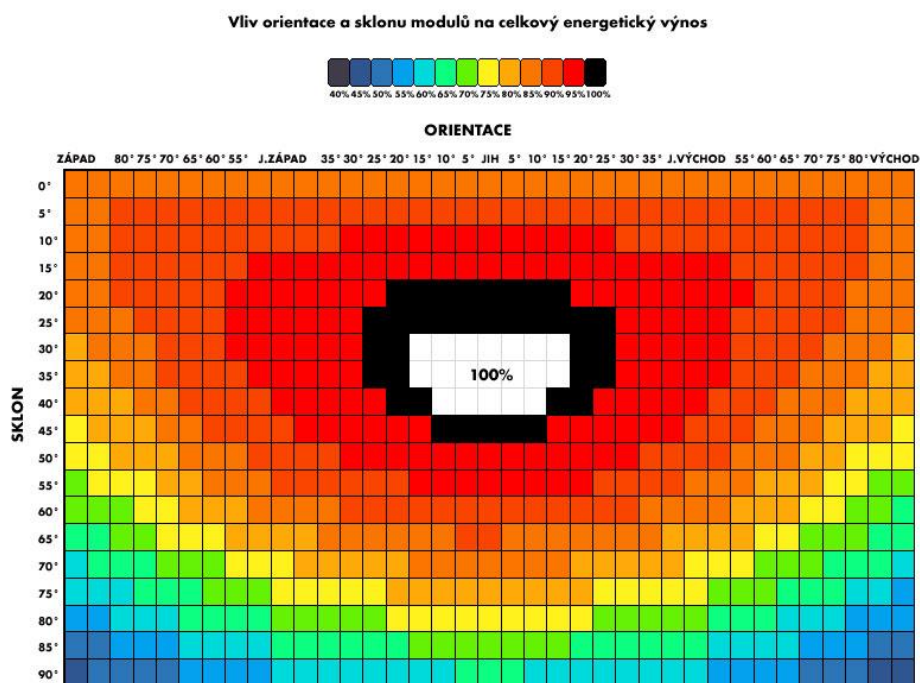
⁴Isopenenergy. *Fotovoltaika v podmínkách České republiky* [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.isopenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>

⁵VPO. *Solární systémy* [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.vpo.cz/solarni-systemy--367.html>



Obr. 6 - Vliv oblačnosti na sluneční záření⁶

Kromě zeměpisné polohy je také důležitý faktor orientace samotných fotovoltaických panelů. Ideální orientací je jih se sklonem 30° až 35°. Avšak jak Obr. 7 naznačuje, i při odchylkách v desítkách stupňů budou ztráty stále přijatelné. Pokud například bude FVE orientována na jihozápad, bude výnos pouze o 5 % nižší. Pro umístění panelů na střechu je možné uvažovat ideální orientaci mezi jihovýchodem až jihozápadem. Při jiné orientaci budou již ztráty znatelnější.



Obr. 7 - Vliv orientace sklonu modulů na celkový energetický výnos⁷

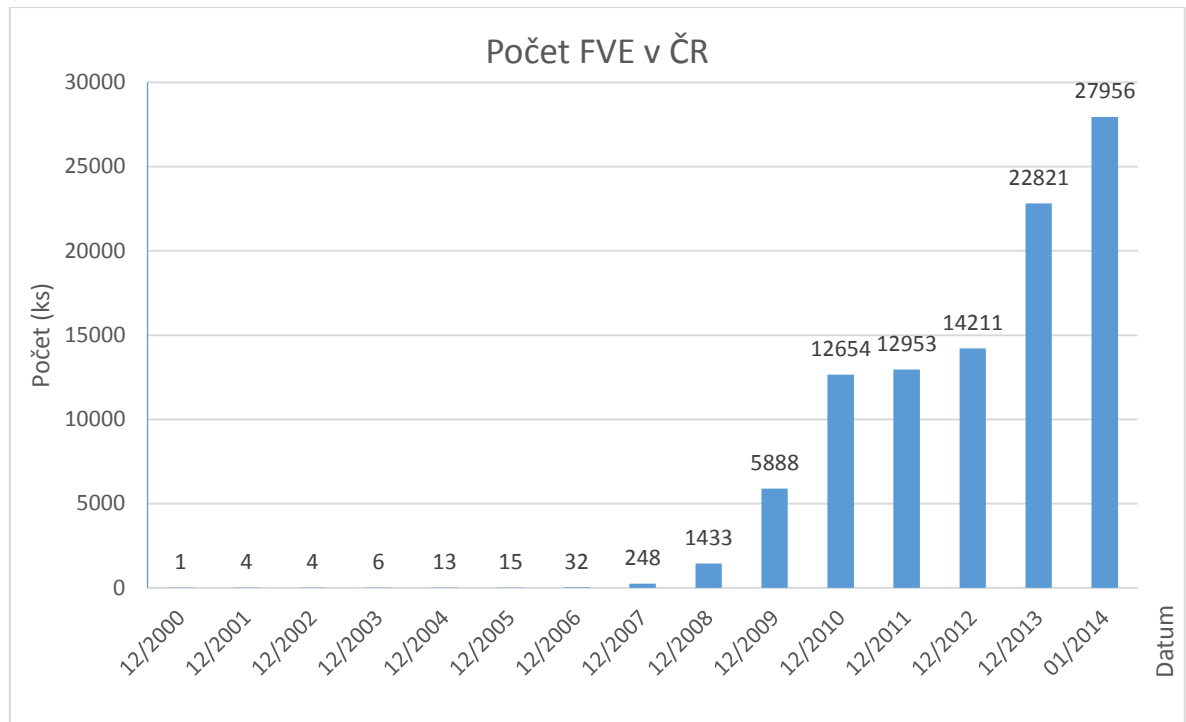
1.7. Statistické údaje o výkonu v České republice

V poslední době rapidně vzrůstal počet instalovaných fotovoltaických elektráren a s tím samozřejmě spojený i vyráběný výkon ze sluneční energie. Pro představu: v roce 2000 byla v ČR instalována pouze jediná solární

⁶ VPO. Solární systémy [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.vpo.cz/solarni-systemy--367.html>

⁷ Solareni. Vliv orientace střechy na energetický výnos elektrárny [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.solareni.cz/slunecni-elektrarny/technicke-informace/vliv-orientace-strechy-na-energeticky-vynos-elektrarny/>

elektrárna, kdežto v lednu 2014 již bylo v provozu téměř 28 tisíc elektráren. Trend posledních let znázorňuje Obr. 8.



Obr. 8 - Počet FVE v ČR⁸

Postupný rozvoj energií z obnovitelných zdrojů nastal po zavedení zákona č. 180/2005 Sb., o podpoře využívání obnovitelných zdrojů (sluneční, větrné, geotermální, vodní, energie z biomasy atd.). Avšak k boomu došlo až v letech 2009 a 2010 (od malých až po velkoplošné elektrárny), kdy vyhlášení dotační podmínky způsobilo hrozbu zdražení elektrické energie. Samotný počet instalovaných elektráren udává jen částečný obrázek, pro ucelený přehled je také podstatný instalovaný výkon. Ten je znázorněn na Obr. 9.

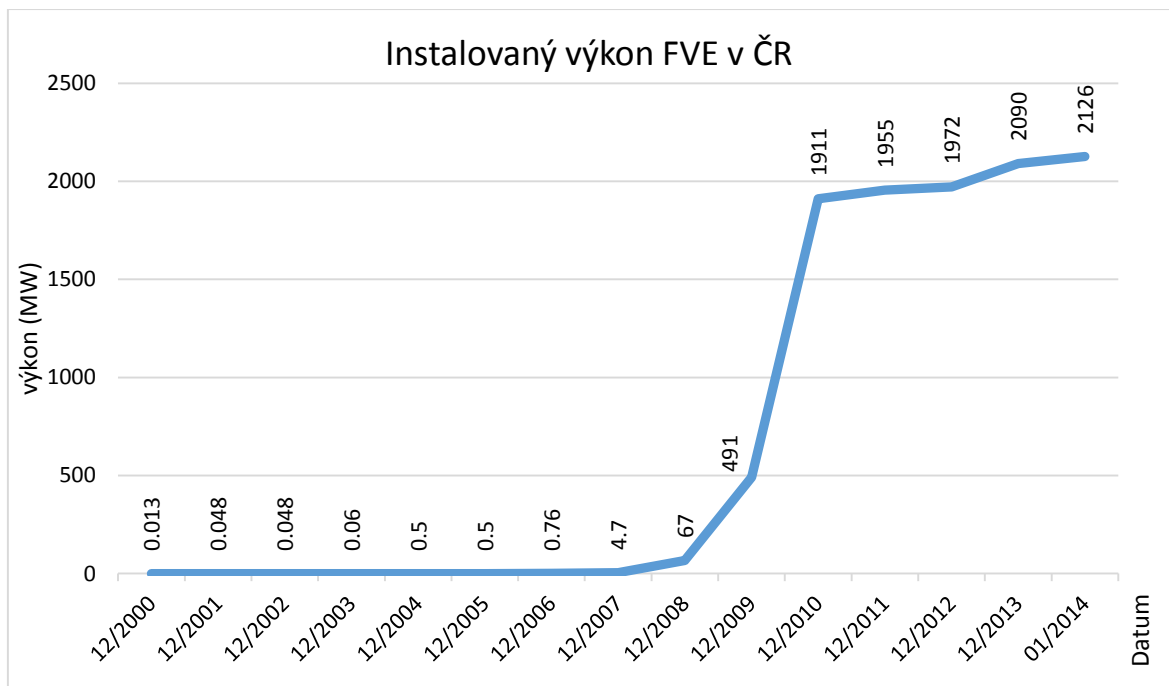
Z globálnějšího pohledu má ČR třetí největší výkon solárních elektráren na obyvatele v rámci Evropské unie. Pouze v roce 2011 byly připojeny solární elektrárny s výkonem 1 959 MW, což představuje výkon 185,3 W na obyvatele. Před námi je v žebříčku největších producentů energie ze slunce Německo s instalovanými 24 678 MW (což představuje 302,8W na obyvatele) a druhá je Itálie s 12 754 MW – 212,6 W na obyvatele.

Nejvíce FVE je lokalizováno v Jihomoravském kraji, k čemuž má tento kraj podle Obr. 4 nejlepší dispozice. Dále následuje kraj Jihočeský a Středočeský. Naopak nejméně FVE je nainstalováno v Karlovarském kraji.

Trend instalovaného výkonu odpovídá trendu počtu instalovaných elektráren. V roce 2000 byl výkon ze sluneční energie v České republice pouze 13 kW, v porovnání s lednem roku 2014, kdy je tento výkon o 1 635 % větší, a

⁸ Solární elektrárny v ČR. *Solární elektrárny v ČR* [online]. 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.elektrarny.pro/>

to 2126 MW. K největšímu nárůstu došlo opět v letech 2009 a 2010 z důvodů zmíněných výše.



Obr. 9 - Instalovaný výkon FVE v ČR⁹

Pro ucelenější představu je v Tab. 2 uveden instalovaný výkon elektráren v rámci ČR. Tabulka říká, že na konci roku 2013 již instalovaný výkon větrných a solárních elektráren převýšil výrobu z vodních elektráren.

1.8. Budoucnost

Od vývoje prvního fotovoltaického článku (první článek z krystalického křemíku se datuje do 50. let minulého století) se vývoj v tomto odvětví posunul nezanedbatelným krokem kupředu. Články jsou vylepšovány z hlediska odolnosti, přizpůsobivosti na montáž, výkonu, čímž umožňují svobodnější montáž prakticky kdekoli. Jako v každém jiném odvětví je kladen tlak nejen na ekologii výroby a případnou likvidaci, ale také a v poslední době především na cenu panelů. V dnešní době není problém koupit panel, který slouží zároveň i jako střešní krytina. Výrobci zůstávají u monokrystalických a polykrystalických panelů s krystalickým křemíkem, protože jsou neúčinnější, jejich posun je však znatelný především v konstrukčním řešení a zvyšování účinnosti panelu (ne křemíku).

⁹ Solární elektrárny v ČR. *Solární elektrárny v ČR* [online]. 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.elektrarny.pro/>

Tab. 2 - Instalovaný výkon elektráren v ČR¹⁰

Forma	12/ 1989	12/ 1993	12/ 2005	12/ 2008	12/ 2009	12/ 2010	12/ 2011	12/ 2012	12/ 2013
Parní elektrárny	11398	10997	10656	10687	10720	10768	10788	10644	10819
Paroplynové, plynové a spalovací elektrárny	0	0	800	903	2183	1024	1102	1 271	1338
Vodní elektrárny	1 433	1479	2159	2180	2183	2203	2201	2 216	2229
Jaderné elektrárny	1 651	1749	3761	3757	3830	3900	3970	4 040	4290
Větrné a solární elektrárny	0	0	17	194	658	2177	2190	2 349	2402
Instalovaný výkon	14483	14227	17412	17724	18326	20073	20250	20520	20737

1.8.1. Mikroformní křemík pro fotovoltaické panely¹¹

Mikroformní moduly jsou vyráběny pomocí tenké vrstvy křemíku nanášené na podklad. Protože se využívá již zmíněná tenká vrstva, je spotřeba křemíku oproti klasickým panelům výrazně menší – přibližně 50krát (u krystalické metody je vrstva tloušťky 100 μm , při mikroformní technologii 2 μm). Dalším podstatným benefitem je menší závislost výkonu na provozní teplotě, moduly jsou lehčí a mohou být vyráběny ve větších formátech. Tato technologie je do jisté míry předurčena pro využití ve vertikálním směru – to znamená okna, dveře. Oproti klasickým fotovoltaickým systémům na krystalické bázi, které jsou netransparentní a náročné na směrové charakteristiky záření (jih, ideálně pod sklonem 35°), dávají tenkovrstvé moduly setrvalejší a lepší výkony i za rozptýleného světla.

1.8.2. Nové tvary¹²

Existují prototypy trojrozměrných článků, které právě díky svému tvaru pracují s vyšší účinností oproti klasickým (konvenční články mají účinnost 15 – 19 %, prototyp pracuje s vyšší než 25 %). Důvodem je právě tvar – klasické články odrazí přibližně 30 procent dopadajícího světla, prototyp díky své konstrukci právě tuto část eliminuje. Vývoj vycházel z poznatků o optických vláknech. Trojrozměrná struktura pracuje tak, že přijaté fotony zadrží na dobu nezbytně nutnou pro jejich převedení na elektrony. Teoreticky se uvádí, že by

¹⁰ EnergoStat. *Aktuální data* [online]. 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://energostat.cz/elektrina.html>

¹¹ ASB-portal. In: *TRENDY VE FOTOVOLTAICE* [online]. 2013 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/trendy-ve-fotovoltaice>

¹² Silekro. In: *Solar3D* [online]. 2013 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.silekro.cz/aktuality/solar3d-zmeni-novy-typ-solarniho-clanku-budoucnost-fotovoltaiky-44>

jejich efektivita měla být až dvojnásobná při stejné ceně, oproti dnes používaným článkům.

Ačkoli poslední dobou klesá důvod pořizovat si solární elektrárnu pro čistý zisk z vyrobené energie, stále přetrvávající fakt ušetření nákladů na provoz, ať již rodinného domu či společnosti, je a bude příčinou, proč se tento trh bude stále rozvíjet a nabízet řešení s lepšími vlastnostmi za nižší pořizovací náklady.

2. SSR (*Solid State Relay*) – úvod do problematiky

Protože jedním z hlavních úkolů této práce je navrhnout a realizovat řízení odporové zátěže pomocí SSR, jsou v této kapitole uvedeny informace, které jsou důležité při jejich výběru a také utvářejí celistvý náhled na problematiku.

SSR je anglická zkratka pro Solid State Relay – tedy polovodičové relé. Jejich vývoj byl motivován tím, aby nahradila klasická relé elektromechanická, která existují již řadu let. Zpočátku se na místě mechanického kontaktu vyskytovala dvojice antiparalelně řazených tyristorů, triaků a dokonce i tranzistorů (které mohou pracovat v lineárním režimu a tím přenést analogový signál na výstup). Dokončení přeměny elektromechanického relé za polovodičové bylo dokončeno použitím galvanického oddělení mezi spínanou a řízenou částí prvku. Avšak vývoj se nezastavil a do součástky se přidávala další a další vylepšení a spolu se zmenšováním rozměrů dospěla součástka až do dnešní podoby. Mnohá relé nepotřebují chlazení, protože byla navržena na tak malé výkony, že ztrátový výkon, který na nich vzniká, dokáže rozptýlit sama.

Výhody:

- již z názvu vyplývá, že nemají žádnou mechanicky pohyblivou část, takže nedochází k opotřebování
- protože není mechanický kontakt, při spínání nedochází ke vzniku oblouků či jiskření
- z těchto dvou skutečností vyplývá dlouhá životnost
- při spínání nevzniká žádný zvuk (cvakání)
- mají vysokou spínací a vypínací rychlost
- jejich odolnost proti nárazům a obecně vibracím je vysoká
- nevznikají kmity při spínání
- jsou odolná vůči pracovnímu prostředí (jsou zalitá epoxidovou pryskyřicí)

Nevýhody

- polovodičová relé produkují teplo především ve vodivém režimu a tím vyšší, čím vyšší je zatěžovací proud
- snazší poškození vstupního i výstupního obvodu přivedením nevhodného napětí, či překročením maximálního proudu
- výstup nedokáže sepnout libovolně malé napětí
- relé nikdy není ideálně rozepnuto (svodový proud)
- vyšší cena než u elektromechanického kusu

Výše jsou uvedeny pouze hlavní výhody a nevýhody. Komplexnější porovnání s elektromechanickými relé je v Tab. 3. Z této tabulky a z vlastností popsaných výše je pak zřetelnější, proč elektromechanická relé ještě nezanikla.

Tab. 3 - Porovnání Elektromechanických a polovodičových relé¹³

Vlastnost	Elektromechanické relé	Elektronické relé
Citlivost na nesprávné použití	malá	značná
Citlivost na korozi, oxidaci a kontaminaci	značná	téměř žádná
Citlivost na mechanické vibrace a zrychlení	značná	žádná
Citlivost na radiaci	žádná	značná
Kompatibilita s TTL a CMOS	žádná	dobrá
Spínací a rozpínací doba	dlouhá	krátká
Snadnost odhalení poruchy	dobrá	malá
Izolační napětí vstup - výstup	4 kV	> 4 kV
Indikace činnosti	vizuálně kontakty	vizuálně LED
Fyzická velikost (objem)	dobrá	lepší
Hmotnost	větší	menší
Možnost vícenásobných výstupů	snadná	horší
Elektrická životnost	špatná	dobrá
Možnost rychlého přepínání	špatná	dobrá
Možnost spínat AC i DC	vždy	některé typy
Možnost spínání indukční zátěže	ano	ano
Možnost spínání malých napětí	ano	omezeně
Možnost provozu ve vlhku	omezená	snadná
Možnost provozu ve výbušném prostředí	omezená	bez omezení
Možnost synchronního spínání	ne	ano
Možnost spínání v nule	ne	ano
Možnost vypínání v nule	ne	ano
Možnost fázového řízení výkonu	ne	ano
Možnost celovlnného řízení výkonu	ne	ano
Úbytek napětí na sepnutých svorkách	malý	velký
Ztrátový výkon	malý	velký
Nutnost chladiče	ne	obvykle ano
Existence oblouku při rozpínání	ano	ne
Zakmitávání kontaktů	ano	ne
Výstupní odpor v sepnutém stavu	> 1MΩ	> 20 kΩ
Výstupní odpor v rozepnutém stavu	< 0,05 Ω	< 0,1 Ω
Generování rušivých signálů	velké	malé
Možnost soft start	ne	ano
Citlivost na externí magnetická pole	velká	malá
Citlivost na zvýšení okolní teploty	malá	velká
Citlivost na elektromagnetické rušení	malé	větší
Citlivost na di/dt a du/dt	žádná	větší

¹³ KREJČIŘÍK, Alexandr. Chlazení SSR. *Solid State relé*. 1. vydání. Praha: BEN, 2002, s. 87. ISBN 80-7300-081-4.

2.1. Základní parametry polovodičových relé¹⁴

- vstupní řídicí signál: typicky od 3 V do 32 V pro DC, od 24 V do 190 V pro DC nebo 24 V až 265 V pro AC
- výstup: silový výstup spínající velké proudy (napětí); běžně dostupné řady 10 A, 25 A, 40 A, 50 A, 75 A a 100 A
- provedení: do plošného spoje (včetně SMD), na panel (na chladič), na DIN lištu, do patice (tzv. Plug-in)
- podle spínaného proudu: AC, DC
- izolační napětí: typicky 2 500 V až 4 000 V
- minimální spínané napětí: typicky 24/42 V pro AC
- podle velikosti jmenovitého napětí: typicky 230/400/480 V pro AC (pro sdružená / fázová napětí)
- počet spínaných fází: jednofázová, třífázová
- zobrazení sepnutého stavu: bez zobrazení, zobrazení kontrolkou LED
- spínání: v nule (minimální náraz do sítě), v maximu (spínání transformátorů), libovolné/okamžité (pro regulaci PWM - *Pulse Width Modulation*), proporcionálně řídíme úhel otevíření spínacího prvku (triaku) – slouží k plynulé regulaci výkonu
- speciální vlastnosti: detekce přehřátí / přetížení / přepětí, SSR pro reverzaci motoru, SSR pro START/STOP motoru, zpětná vazba kontroly sepnutí, výstupní RC filtr pro potlačení špiček

2.2. Druhy spínání

Elektromechanická relé je možné spínat libovolně podle přivedení řídicího napětí. V oblasti polovodičových relé si musíme podle žádaného použití vybrat správný typ podle spínání:

2.2.1. „Okamžité“ / asynchronní spínání

K sepnutí řídicího členu nedojde samozřejmě „okamžitě“, ale podle zpoždění na řídicím prvku. Obecně platí, že čím je SSR určeno pro vyšší proudy, tím je jeho spínací a rozpínací doba delší:

- SSR relé PC3SD12NTZAF, spínací proud 100 mA, spínací doba 50 μ s¹⁵
- SSR relé KSD215AC3, spínací proud 15 A, spínací doba 8,3 ms¹⁶

K podobnému zpoždění dochází i během vypínání. Zde navíc začínají hrát roli i vlastnosti spínacího prvku. Například pro tyristor můžeme uvažovat dva případy:

¹⁴ SSR: nejdůležitější parametry i stinné stránky. www.hw.cz [online]. 2013 [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/vykonove-obvody/ssr-nejdulezitejsi-parametry-i-stinne-stranky.html>

¹⁵ Datasheet PC3SD12NTZAF, 2004, s. 2. Dostupné z: http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/pc3sd12_e.pdf

¹⁶ Datasheet KSD215AC3, 2004, s. 2. Dostupné z: <http://www.cosmo-ic.com/object/products/KSD215AC3.pdf>

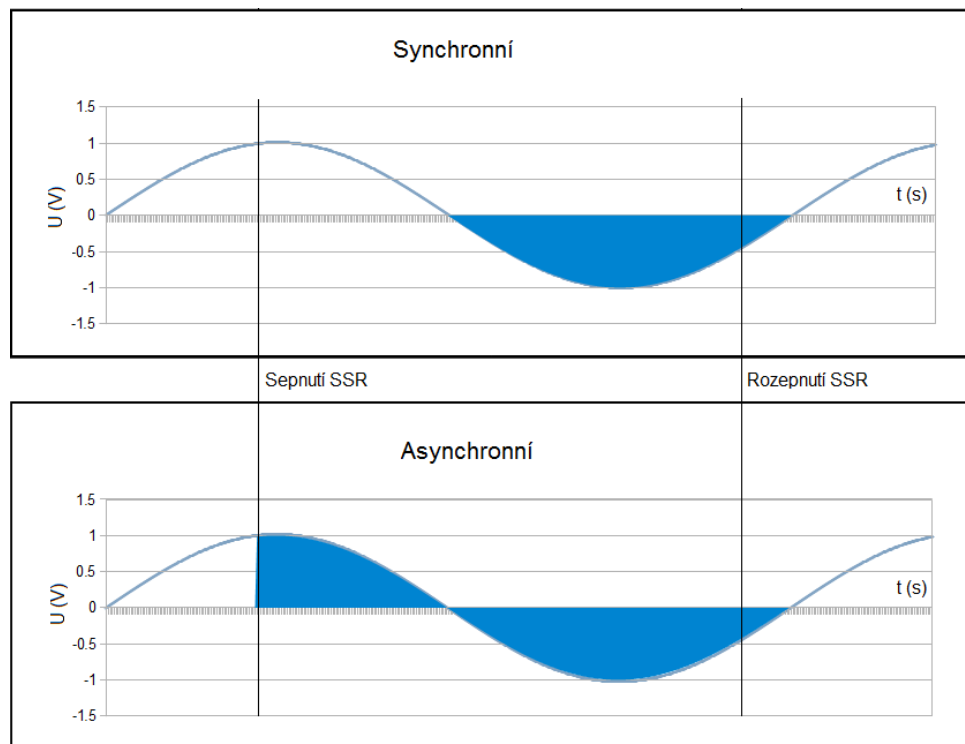
- Stejnoseměrné výstupní napětí – vypnutí je možné pouze snížením výstupního proudu pod úroveň přídržného proudu
- Střídavé výstupní napětí – k rozepnutí dochází až na konci půlperrody

Při zapojení SSR s tyristorem do střídavé sítě s frekvencí 50 Hz může dojít k prodlevě při rozepnutí až 10 ms.

2.2.2. Spínání v nule / synchronní spínání

K sepnutí/rozepnutí dochází pouze v oblasti blízké napětí průchodu nulou. Tímto se minimalizuje vř rušení. K vypnutí prvku dochází opět při průchodu proudu nulou. Tento typ je vhodný pro spínání odporové zátěže.

Ukázka spínání je na Obr. 10, jsou zde vyznačeny spínací a rozpínací časy a také je patrné, že synchronní spínání sepne a rozepne pouze v okamžiku, kdy se napětí blíží nule. Asynchronní naopak spíná „téměř okamžitě“.



Obr. 10 - Ukázka spínání synchronního a asynchronního SSR

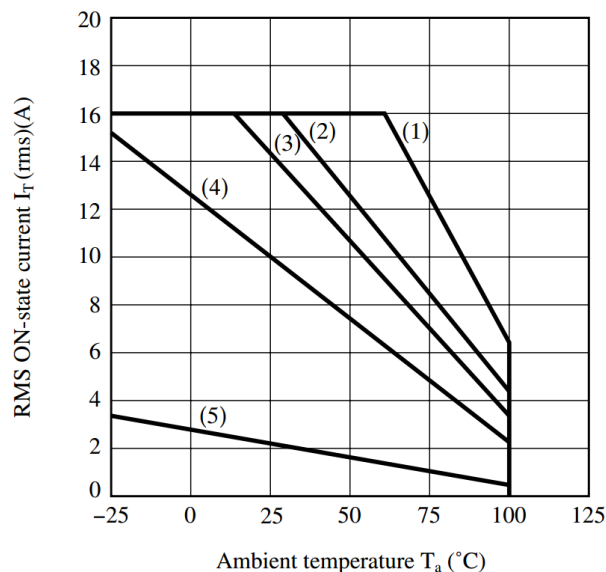
2.3. Vazby mezi vstupem a výstupem¹⁷

Jak již bylo zmíněno, mezi jednu z hlavních výhod SSR patří galvanické oddělení mezi vstupem a výstupem. Toto oddělení může být realizováno různými způsoby a každé má své výhody a naopak nevýhody:

- Opticky – jedno z nejpoužívanějších řešení pomocí optronu. Největší výhodou optronu oproti ostatním řešením je pouze jednosměrný přenos signálu od vstupu k výstupu (obráceně se projevují pouze parazitní kapacity). Naopak nevýhodou je omezená izolační vzdálenost, která je dána vzdáleností právě optronem, ale tuto nevýhodu je možné odstranit použitím světlovodu.
- Elektromagneticky – pomocí oddělovacího transformátoru. Hlavní nevýhodou tohoto řešení je především zpětný přenos signálu, což při poruše může způsobit přenos nežádaného signálu do řídicí části obvodu.
- Kapacitně – stejně jako elektromagnetické oddělení i toto patří mezi méně používané, a to opět z důvodu zpětného přenosu signálu z výstupu na vstup.
- Elektromechanicky – toto spínání není vhodné pro spínání pomocí PWM.

2.4. Vyzářené teplo

Asi hlavní nevýhodou všech SSR je úbytek napětí na spínacím prvku uvnitř, který se projevuje jako vyzářené teplo. Zejména při spínání vyšších výkonů je nutné toto teplo chladit (ztrátový výkon je přímo úměrný protékajícímu proudu).



Obr. 11 - Příklad uvádění velikostí chladičů pro různé zatěžovací proudy pro SSR Sharp S216S02¹⁸

¹⁷ SSR: nejdůležitější parametry i stinné stránky. www.hw.cz [online]. 2013 [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/vykonove-obvody/ssr-nejdulezitejsi-parametry-i-stinne-stranky.html>

¹⁸ Datasheet KSD215AC3, 2004, s. 6. Dostupné z: http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/s116s02_e.pdf

Výrobce obvykle uvádí graf, kde jsou uvedeny velikosti chladičů v závislosti na teplotě okolí a zatěžovaném proudu. Takový příklad je na Obr. 11. Na ose x je uvedena teplota okolí a na ose y protékající proud. Čísla jednotlivých charakteristik odpovídají velikostem chladičů z AL plechu: (1) nekonečné velikosti, (2) 280 mm x 280 mm x 2 mm, (3) 200 mm x 200 mm x 2 mm, (4) 100 mm x 100 mm x 2 mm a (5) bez chladiče.

2.5. Spojování SSR

Řídicí signály můžeme řadit jak paralelně, tak sériově (za předpokladu správného buzení). U spínacího prvku tomu tak již bohužel není. Při sériovém spojení SSR je možné zvětšit maximální spínané napětí. Při paralelním řazení však nedochází (nemůžeme uvažovat) ke zvětšení maximálního spínaného proudu. Důvod je ten, že nedojde k rovnoměrnému rozložení proudů mezi několik paralelně řazených prvků (žádný prvek není identický). Dalším důvodem je, že nikdy nedokážeme zaručit současné sepnutí dvou prvků a tím pádem dojde k přetížení jednoho z nich.

2.6. Použití¹⁹

Polovodičová relé jsou vhodná pro spínání odporové, kapacitní i induktivní zátěže. Avšak každá zátěž má určitá omezení, která je vhodné dodržet.

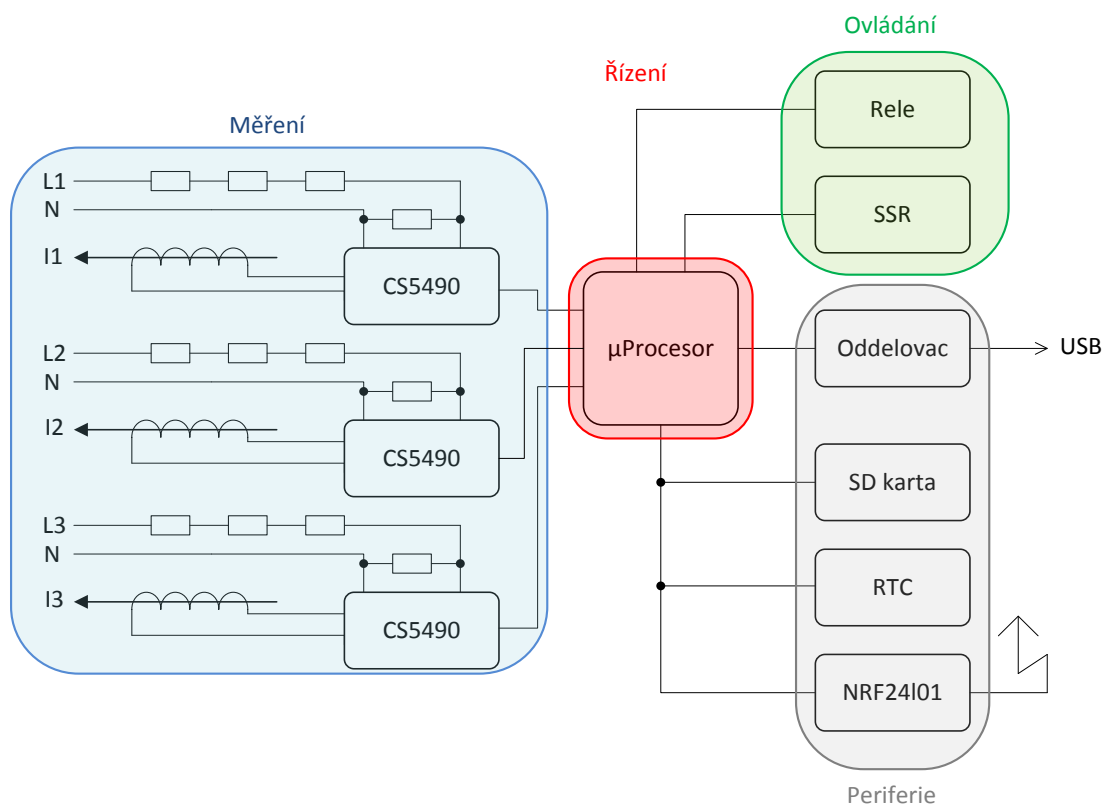
Při odporové zátěži nedochází k posunu napětí a proudu a při spínání této zátěže je nutné pouze dodržet poměr di/dt , což je dáno pouze impedancí vedení a charakteristikou spínacího prvku. Pokud však používáme synchronní SSR, nehrozí překročení tohoto limitu.

Při spínání kapacitní i induktivní zátěže je opět nutné sledovat poměr di/dt . Pro spínání transformátorů je vhodné použít SSR relé se spínáním v maximu.

¹⁹ Polovodičové stykače - Solid State Relay. *Informace o SSR* [online]. 2013 [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <http://www.elproz.cz/Ssr.htm>

3. Návrh řídicí jednotky odběru

Na Obr. 12 je zobrazeno blokové schéma návrhu. Celé schéma je rozděleno do 4 skupin: měření, řízení, ovládání a periferie. Pro komunikaci s měřicími čipy jsou použita tři rozhraní UART (*Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter*). Pro řízení spotřeby je připraveno elektromechanické relé (řízené digitálním výstupem) a SSR (řízené PWM modulací). Pro případné rozšíření je signál PWM vyveden na svorky, kam je možné připojit externí SSR. Pro záznam naměřených hodnot („log“) je zapojení doplněno o SD (*Secure Digital*) slot. Pro účely záznamu také slouží hodiny reálného času (RTC - *Real Time Clock*) zálohované baterií pro případ výpadku napájecího napětí. Komunikace s PC je přes rozhraní USB (*Universal Serial Bus*), které je odděleno od zbytku zapojení izolátorem. Toto řešení je ekonomicky méně náročné než každý měřicí čip oddělovat samostatně. Další rozšíření je možné s využitím modulu pro bezdrátový přenos (NRF24I01) pracujícím na frekvenci 2,4 GHz.



Obr. 12 - Blokové schéma

3.1. Měření

Výkon je měřen třífázově pomocí tří čipů CS5490. Měření výkonu probíhá dvoukanálově pomocí dvou 24-bitových sigma-delta A/D (*Analog/Digital*) převodníků (pro každý kanál jeden). Jejich přesnost je deklarována výrobcem 0,1 % z rozsahu, obsahují jeden konfigurovatelný digitální výstup a pro měření proudu podporují měření úbytku na rezistoru, proudový transformátor, nebo Rogowského cívku. Jejich předností je nízký příkon (<13 mW).

3.2. Mikroprocesor

Mikrokontrolér byl vybrán především z požadavků na počet rozhraní (minimálně 3 UARTy, SPI) a požadovaný minimální počet pinů pro všechny periferie – od PWM modulace přes piny pro SD kartu, hodiny reálného času, bezdrátový modul až po indikační LED diody. Důležitým parametrem byla také možnost rozšíření zapojení o USB. S USB také souvisí frekvence čipu, která musí být dostatečně vysoká, aby v požadovaném čase byl čip schopný obsloužit všechny požadavky.

Podle výše uvedených kritérií padla volba na čipy ATxmegaxxxA3U, kde můžeme za xxx dosadit velikost dostupné flash paměti v hodnotách 064/128/192/256. Jejich pouzdra jsou stejná, takže čipu s menší pamětí odpovídají porty a periferie čipu s vyšší pamětí. V Tab. 4 je uveden soupis důležitých parametrů, podle kterých byl čip vybrán.

Tab. 4 - Důležité parametry mikročipu atXmega 128A3U²⁰

Parametr	Hodnota
Max. frekvence (MHz):	32 MHz
Max I/O pinů:	50
Ext. přerušení:	50
USB (počet):	1
USB rychlost:	Full Speed
SPI (počet):	10
TWI (I2C):	2
UART (počet):	7
Časovače (počet):	7

Parametr	Hodnota
PWM (počet):	22
ADC (počet):	16
ADC rozlišení (bit):	12
ADC rychlost (ksps):	2000
SRAM (KB):	8
EEPROM (B):	2048
Pracovní napětí (Vcc):	1.6 to 3.6
Teplotní rozsah(°C):	-40 to 85

3.3. SD karta, RTC, NRF24I01

Všechny tyto 3 „moduly“ komunikují prostřednictvím rozhraní SPI. SD karta není napájena stále, ale pouze při přístupu k datům, což je zajištěno tranzistorem T11. Pro hodiny reálného času je použit obvod DS1306 s krystalem 32768 Hz a se záložní baterií pro případ výpadku napájecího napětí. Jak obvod SD karty, tak RTC je modulární – tzn. je možné jej vyměnit jako celý blok odpájením od „základní desky“.

NRF24I01 je low-cost 2,4 GHz transceiver s nízkou spotřebou schopný přenášet data rychlostí až 2 Mbps.

3.4. Relé, SSR

Pro řízení zátěže je na DPS (Deska Plošných Spojů) umístěno elektromechanické relé schopné spínat jmenovité napětí 250 V a trvalý proud 16 A (určené především pro spínání trvalejšího charakteru).

²⁰ Atmel. *AVR XMEGA Microcontrollers* [online]. 2011 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/avr_xmega.aspx?tab=overview

Pro „spojitou“ regulaci je deska vybavena SSR KSD215AC3, jehož charakteristiky a vlastnosti jsou uvedeny v kapitole Návrh chladiče pro SSR relé. Toto relé je spínáno PWM modulací. Pro dodržení správné funkčnosti relé je samozřejmě doplněno o chlazení, jak pasivní, tak aktivní. Pasivní chlazení je doplněno o teplotní snímač TMP36GT9Z, jehož výstupem je napětí přímo odpovídající měřené teplotě, je připojeno na A/D převodník mikroprocesoru. Tímto snímáním bude jednak spouštěn větráček, ale také v případě přehřívání celé SSR odstaveno.

Jako třetí je na desce možné využít PWM výstup pro připojení externích SSR, ať již na chladič, nebo DIN lištu, které dovolují díky mohutnějšímu chlazení a celkové své velikosti spínání mnohem vyšších proudů než SSR použité na DPS.

3.5. Napájení

Na desce je použito dvojí napájení 3,3 V a 12 V. Původně byl záměr navrhnout zapojení pouze s jedním, ale integrované SSR vyžaduje napětí v rozmezí 5 - 12 V a pro případné externí SSR je napětí 12 V univerzální (valná většina je schopna s tímto napětím pracovat). Samotný transformátor je napájen z 1. fáze měřicí části obvodu.

Pro dimenzování transformátoru byla použita Tab. 5, ze které je patrné, že minimální hodnota transformátoru musí být větší než 2 VA. Pro případné zajištění funkčnosti zařízení i při vyšších odběrech byl vybrán transformátor 3,2 VA. Napětí z něj je upraveno pomocí dvou stabilizátorů na již dříve zmíněných 12 V a 3,3 V.

Tab. 5 - Napájecí charakteristiky jednotlivých součástek

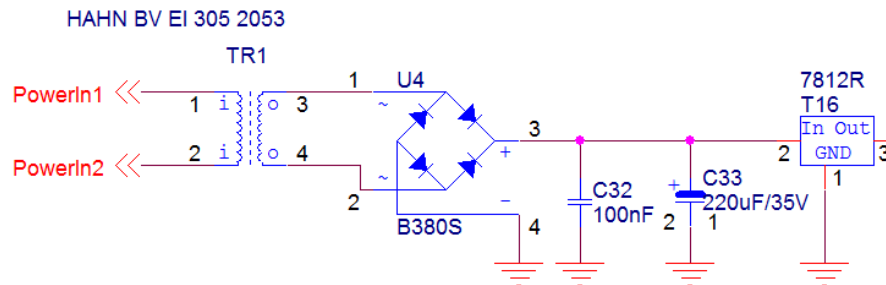
Součástka	U (V)	I (mA)	Počet	P (W)
NRF24101	3.3	120	1	0.3960
Ventilátor	5	70	1	0.3500
DS1306	3.3	10	1	0.0330
CS5490	3.3	10	3	0.0990
Temp	3.3	0.1	1	0.0003
SSR	12	35	1	0.4200
Relay	12	54	1	0.6480
Led	1.9	2	6	0.0228

Σ 1.969

4. Rozbor řešení

4.1. Napájení

Napájení je řešeno spojitě pomocí transformátoru HAHN BV EI 305 2053. Tento typ transformátoru má jedno sekundární vinutí o napětí 15 V a výkonu 3 VA, což dodává třetinovou rezervu oproti výkonovým požadavkům spočítaným v Tab. 5. Při výběru tohoto transformátoru nehrály roli pouze elektrické parametry, ale také hmotnost a rozměry, aby na DPS zabíral co nejméně místa. Transformovaný výstup je přiveden na usměrňovací můstek U4. Ten je dimenzován na 600 V / 1 A, ze kterého je napájen stabilizátor na T16, jenž snižuje napětí na 12 V. Na vstupu a výstupu z tohoto transformátoru jsou filtrační kondenzátory C32 a C33, respektive C51 a C52. Protože transformátor TR1 dodává napětí naprázdno 32 V (změřeno), je nutné s touto hodnotou počítat při výběru elektrolytického kondenzátoru C33 a dimenzovat jej na nejméně 35 V.

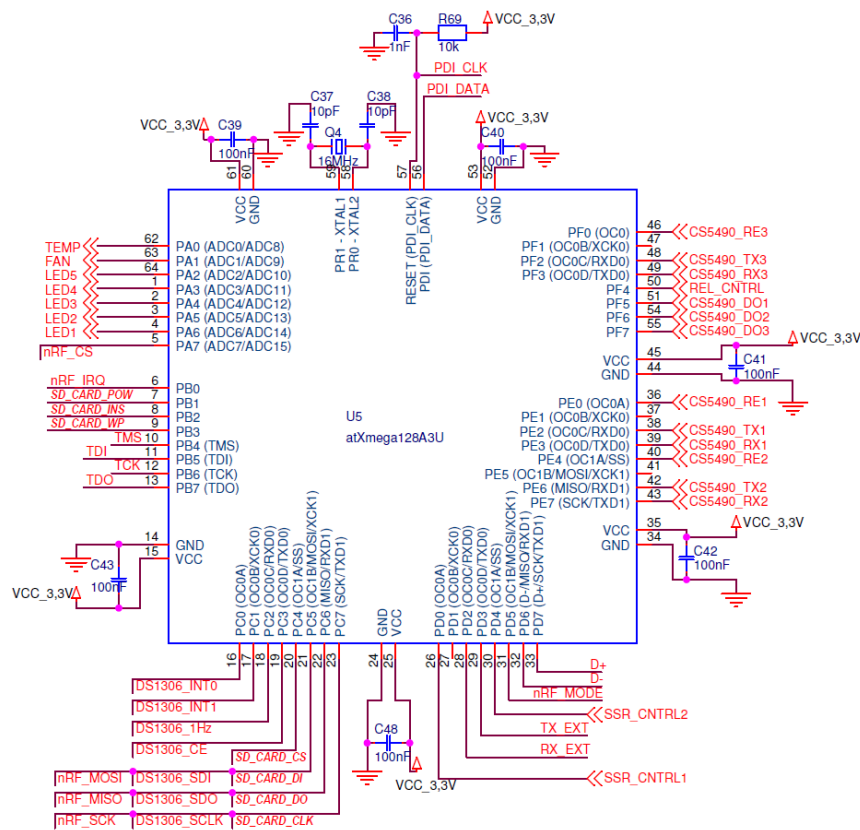


Obr. 13 – Ukázka části napájecího zdroje

Obr. 13 ukazuje část napájecího zdroje s transformátorem, usměrňovacím můstkem, vstupními filtračními kondenzátory pro stabilizátor 7812R. Z výstupu tohoto stabilizátoru na 12 V je dále napájen další stabilizátor na 3,3 V T10 přes filtrační kondenzátory a oba tvoří dva stupně napájení pro celý modul.

4.2. Mikroprocesor

Mikroprocesor je napájen 3,3 V celkem šestkrát pro každý port. Na všech vstupech je umístěn filtrační kondenzátor 100 nF. Ačkoli je aTmega 128A3U schopna pracovat na frekvenci 32 MHz, maximální kmitočet vstupního oscilátoru je limitován na 16 MHz, přechod na vyšší frekvenci je pomocí vnitřní FMPLL (*Frequency Modulated Phase Lock Loop*). Reset je opatřen Pull-Up rezistorem s filtračním kondenzátorem (R69, C36). Jak je z Obr. 14 zřejmé, jsou využity téměř veškeré dostupné piny. Pro programování je možné využít známý JTAG (Joint Test Action Group), nebo také rozhraní PDI, které oproti JTAGu je pouze čtyřvodičové. Pro SD kartu, hodiny reálného času a bezdrátový modul je použito jedno rozhraní SPI – na rozdíl od měřicích čipů, které již z povahy UARTu jsou připojeny každý na jedno rozhraní.

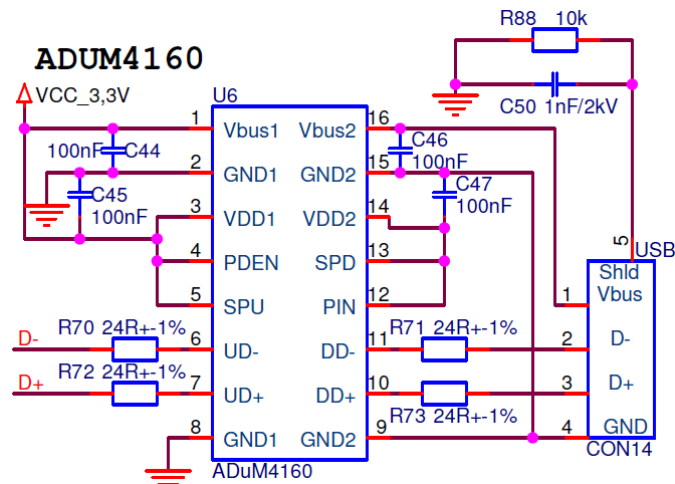


Obr. 14 - Zapojení mikroprocesoru

4.3. Rozhraní USB

Protože celý systém bude možné konfigurovat pomocí rozhraní USB, je nutné zajistit galvanické oddělení mezi měřicí částí a počítačem. Z hlediska návrhu je možné postupovat dvěma hlavními směry. První je oddělit signály vystupující z měřicích členů před vstupem do mikroprocesoru. Mezi výhody tohoto přístupu nepochybně patří větší ochrana mikroprocesoru a částí za ním (připojené PC). Nevýhodami jsou naopak větší pořizovací cena (3ks měřicích členů → 3 oddělovací členy) a také prostorová náročnost na plošném spoji, nehledě na nutnost oddělit napájení pro měření a zbytek DPS. Z těchto důvodů byla vybrána varianta druhá – oddělit pouze rozhraní mezi mikroprocesorem a PC.

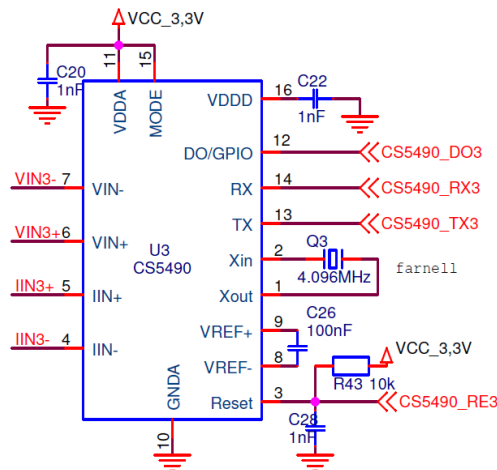
Zvolen byl izolátor ADUM4160, který obsahuje oddělovací transformátory s možností obousměrné komunikace při možnosti komunikovat využitím USB 2.0. Další výhodou tohoto izolátoru je možnost duálního napájení (3,3 V a 5 V) – strana modulu je napájena 3,3 V a rozhraní z počítače 5 V. Schéma zapojení je na Obr. 15. Protože USB konektor by měl být spojen se zemí modulu, je tak učiněno přes 10kΩ rezistor a 1 nF kondenzátor dimenzovaný na 2 kV. R88 je zde z důvodu případného vybíjení C50. Levá strana na schématu je napájena 3,3 V a přísluší k mikroprocesoru a pravá strana je napájena z konektoru USB a přísluší k PC.



Obr. 15 - Oddělovač USB

4.4. Měření

Čipy CS5490 jsou zapojeny podle Obr. 16. VIN+, VIN-, IIN+ a IIN- jsou vstupy pro proudové a napěťové signály. Každý čip je taktován externím oscilátorem o frekvenci 4,096 MHz. Na vstupy Vref+ a Vref- musí být připojen 100 nF kondenzátor pro filtraci, protože pomocí něj si čip vytváří vnitřní napěťovou referenci. CS5490 umožňuje komunikaci buď rozhraním UART (použito), nebo pomocí třívodičového rozhraní. Typ komunikace se volí hardwarově pomocí pinu MODE (při připojení na VCC → UART, při připojení na GND → 3 vodičové rozhraní). Stejně jako reset na mikroprocesoru jsou i resetovací piny zde připojeny na pull-up rezistory s filtračními kondenzátory.

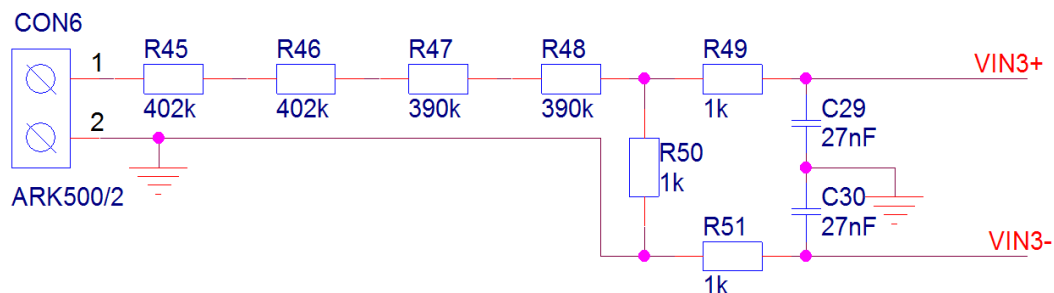


Obr. 16 - Zapojení měřicího čipu CS5490

Napětí je snímáno odporovým děličem a proud je měřen proudovým transformátorem. Protože CS5490 neměří absolutní hodnoty napětí a proudu, je nutné obě hodnoty převést na napětí (i z proudového transformátoru) a upravit na správné úrovni, aby měřicí vstupy nebyly „přebuzeny“.

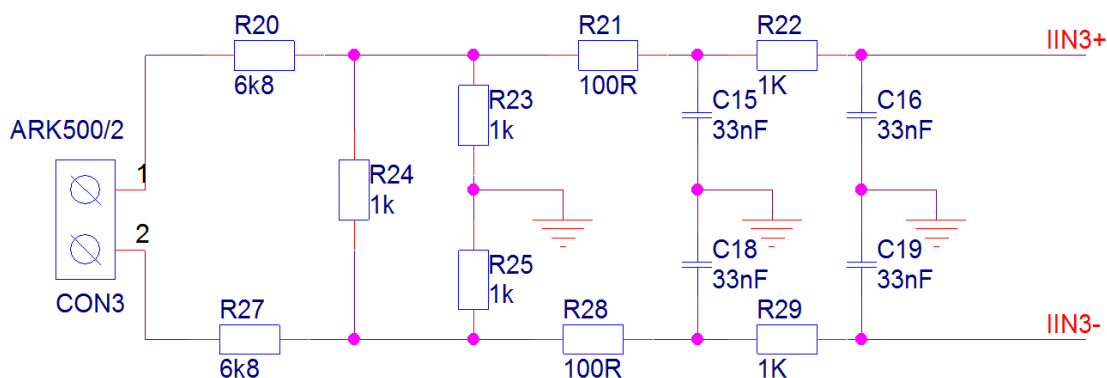
V napěťové větvi je napětí upraveno odporovým děličem. Z normy²¹ je definováno maximální dovolené napětí v síti 253 V_{rms}. CS5490 pracuje s maximálním napětím 176,78 mV_{rms}. Pro napěťovou větev je použit odporový dělič, který je navržen tak, jak je znázorněno na Obr. 17. Rezistory R45, R46, R47, R48 a R50 snižují napětí na vstupu měřicího členu. Při těchto hodnotách součástek je maximální napětí připojitelné na svorku CON6 280,5 V_{rms}. Rezistor R49 s kondenzátorem C29 a R51 s C30 tvoří dolnofrekvenční filtr s mezní frekvencí:

$$f_{cv} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 27^{-9}} = 5894,63 \text{ Hz} \quad (1)$$



Obr. 17 - Napěťový kanál pro měření 3. fáze

Proud je měřen proudovým transformátorem s převodem 1:1000. Použitý je transformátor AC1025, což značí maximální trvalý proud transformátorem 25 A. Tento měřený proud odpovídá 25 mA na výstupu transformátoru. Takto „malý proud“ převedeme na napětí přímo na DPS s proudovými transformátory. Toto napětí je upraveno napěťovým děličem na odpovídající úroveň (max. 176,78 mV_{rms}).



Obr. 18 - Proudový kanál pro měření 3. fáze

Opět je zde použit filtr pro odfiltrování vyšších harmonických. Tyto filtry jsou dva v sérii. První je tvořen R21, C15 (respektive R28, C18) a jeho mezní frekvence je v (2).

$$f_{ci1} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 33^{-9}} = 48 \ 228,77 \text{ Hz} \quad (2)$$

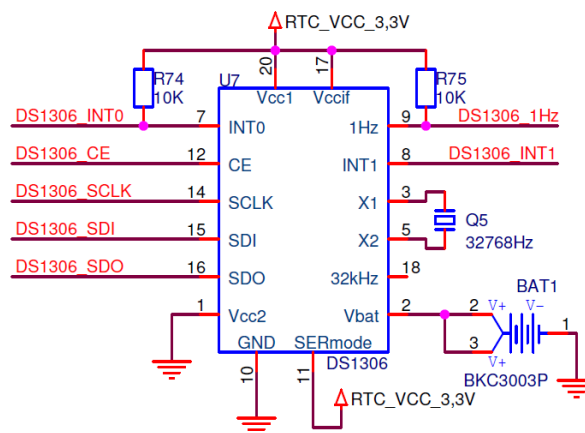
²¹ ČSN 33 0121. *Elektrotechnické předpisy - Jmenovitá napětí veřejných distribučních sítí nn.* 2001

R22, C16 (respektive R29, C19) tvoří druhý filtr s mezní frekvencí:

$$f_{ci1} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 33^{-9}} = 4\,822,88 \text{ Hz} \quad (3)$$

4.5. RTC

Hodiny reálného času jsou řešeny obvodem DS1306 taktovaným oscilátorem pro RTC na frekvenci 32768 Hz. Pro mikroprocesor tento čip negeneruje pouze hodiny, ale také 1 Hz signál a také konfigurovatelná přerušení INT0 a INT1, která budou sloužit (po nastavení) k uspání celého systému v nočních hodinách a jeho opětovného probuzení ráno. INT0 je aktivní v nule a INT1 je aktivní v logické jedničce. Napájení je opět 3,3 V a v případě výpadku je zajištěno baterií CR2032.

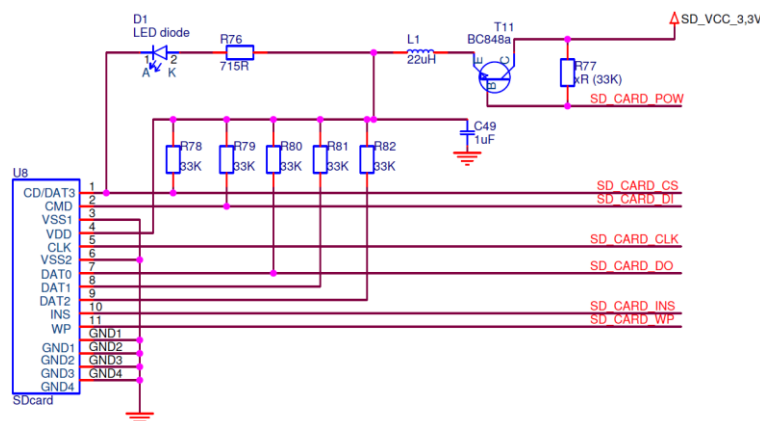


Obr. 19 - Zapojení RTC

Kromě hodin reálného času čip také disponuje interní pamětí o velikosti 96B pro uložení důležitých konstant s možností dávkového zapisování i čtení dat. Čip umožňuje volbu mezi komunikačními rozhraními SPI a třívodičovým rozhraním.

4.6. SD karta

Rozhraní pro SD kartu je znázorněno na Obr. 20. Napájení je spínáno podle potřeby, takže slot není napájen, pokud karta není vložena a minimalizuje se tím její poničení. Led D1 indikuje *chip select* na rozhraní SPI. Rezistory R78 až R82 slouží pro udržování slabé logické '1' na příslušných vodičích.



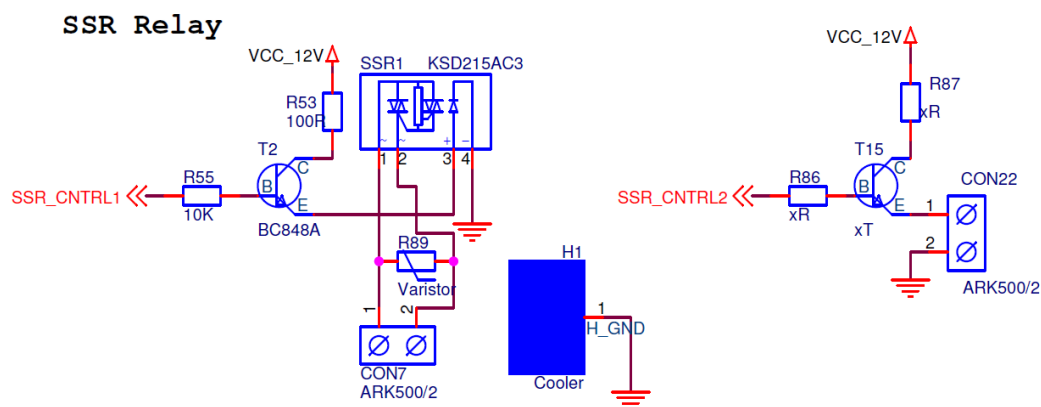
Obr. 20 - Zapojení SD karty

4.7. Řízení

Ovládání zátěží je realizováno pomocí SSR a klasického elektromechanického relé přímo na desce. Pro další rozšíření je také vyveden spínaný výstup na externí SSR.

4.8. SSR

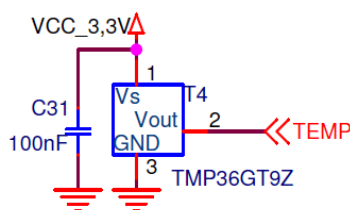
Na Obr. 21 je schéma zapojení pro SSR, které je spínáno PWM přes tranzistor T2. Výstup SSR je opatřen varistorem R89 kvůli napětovým špičkám, které mohou vzniknout při odpojování zátěže. SSR1 je opatřeno chladičem H1, který je uzemněn, a také aktivním chlazením (ventilátorem) o průměru 40 mm. Externí SSR je ovládáno stejně a podle potřeby na napájecí napětí budou zvoleny hodnoty součástek R86, R87 a T15.



Obr. 21 - Schéma SSR a rozhraní pro externí SSR

Z hlediska ochrany je chladič opatřen snímačem teploty TMP36GT9Z (Obr. 22). Jedná se o nízkonapětový snímač teploty schopný měřit od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na svém výstupu vytváří napětí 750 mV při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a poté změnu $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Takže $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ bude odpovídat napětí $0,8\text{ V}$.

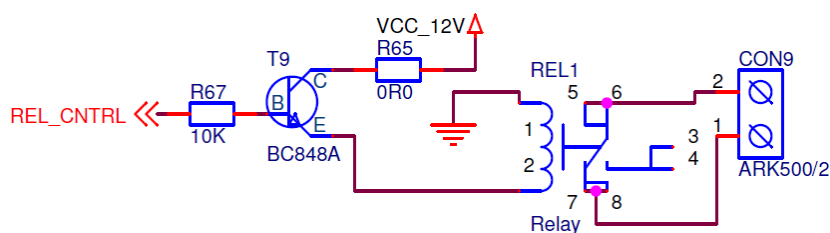
Temperature



Obr. 22 - Teplotní senzor

4.9. Relé

Druhým typem možného ovládání je elektromechanické relé ovládané přes tranzistor T9. Schéma viz Obr. 23.



Obr. 23 – Schéma zapojení elektromagnetického relé

4.10. LED

Led diody jsou spínány přes tranzistory T1, T3, T5, T6 a T7 a proud do katody je omezen pomocí rezistorů o hodnotách 68R.

4.11. JTAG a PDI

Na DPS jsou umístěny 2 programovací rozhraní – JTAG a PDI. PDI je výhodné rozhraní z hlediska ušetření místa, protože je pouze čtyřvodičové a je obdobou ISP s rozšířením o debugování. JTAG rozhraní bylo přidáno pouze pro případ nefunkčnosti PDI (stalo se při návrhu).

5. Návrh chladiče pro SSR relé

SSR relé produkuje teplo během svého vodivého stavu, což je dáno úbytkem napětí na polovodiči a je přímo úměrné zatěžovanému proudu. Běžné hodnoty tepelného odporu pro SSR relé jsou běžné v rozmezí 3,5 až 0,5 °C/W. Toto teplo je nutné odvádět a tím udržovat SSR relé v pracovních teplotách a tím předejít jeho zničení.

Schopnost chladiče rozptýlit tepelnou energii je určena jeho teplotní impedancí (°C/W), která je založena na přirozeném toku vzduchu kolem povrchu chladiče. Obecně platí, že čím větší je plocha chladiče, tím menší je jeho teplotní impedance a tím vyšší je schopnost odvést teplo.

5.1. SSR relé KSD215AC3

Tab. 6 – Vlastnosti SSR relé KSD215AC3²²

Spínání v nule	Ano	U _{max} (rms)	250 V
Ton/Toff	8,3 ms/8,3 ms	R _{th(j-c)}	1,3 °C/W
I _{max} (trvale)	15A	Úbytek napětí	1,5 V
I _{max} (pulzně)	150A		

Pro realizaci budeme uvažovat SSR relé s vlastnostmi uvedenými v Tab. 6. Ztrátový výkon, který je potřeba chladit, se rovná úbytku napětí na řídicím členu v sepnutém stavu vynásobeném protékajícím proudem (uvažujeme maximální zatěžovací proud):

$$P = U_T \cdot I_{MAX} = 1,5 \cdot 15 = 22,5W \quad (4)$$

Rozdíl teplot mezi přechody a povrchem vypočítáme využitím tepelného odporu SSR relé mezi přechodem a pouzdrem (*junction-case*):

$$\Delta T = P \cdot K_{t(j-c)} = 22,5 \cdot 1,3 = 29,25 K \quad (5)$$

Maximální teplota pro SSR relé s optickou vazbou je 110°C²³. Ze znalosti rozdílu teplot mezi přechodem a pouzdrem určíme teplotu pouzdra SSR relé:

$$T_h = T_j - \Delta T = 110 - 29,25 = 80,75 °C \quad (6)$$

Pro výpočet teplotního spádu neboli rozdílu teplot na chladiči budeme uvažovat teplotu okolí (T_a) 25°C, protože pro tuto hodnotu jsou uváděny parametry pro KSD215AC3 v datasheetu:

$$\Delta T_{ch} = T_h - T_a = 80,75 - 25 = 55,75°C \quad (7)$$

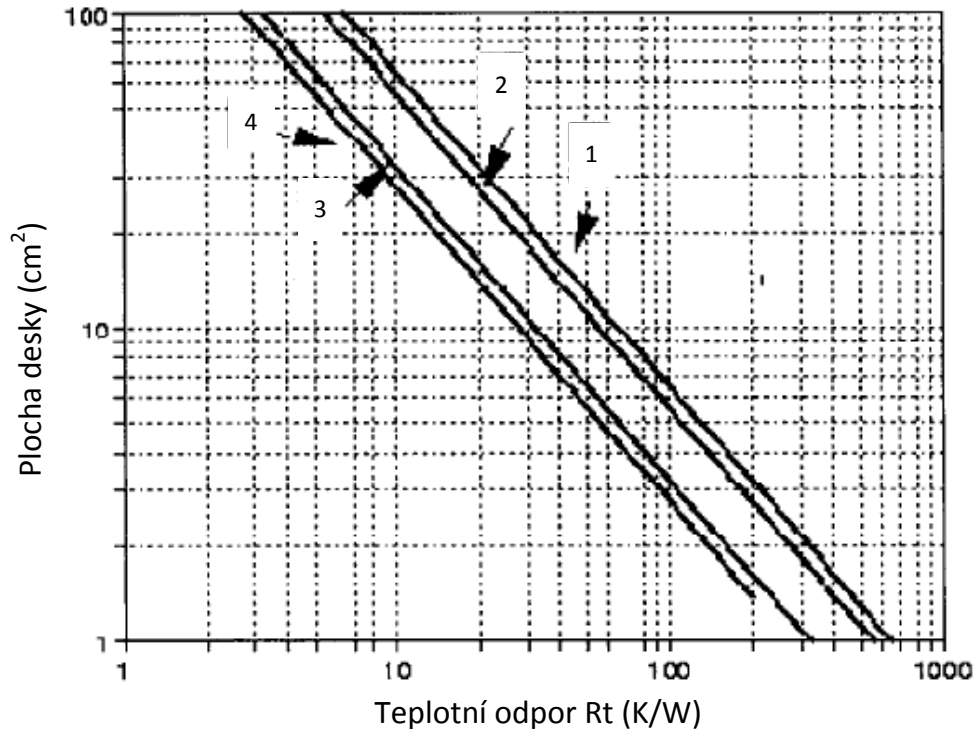
Chladičem bude „téct“ stejný tepelný tok jako chlazenou součástkou a při znalosti výkonu, který potřebujeme chladit, jsme schopni určit tepelný odpor chladiče (podle této hodnoty jsme schopni vybrat chladič):

²² Datasheet KSD215AC3, 2004, s. 2. Dostupné z: <http://www.cosmo-ic.com/object/products/KSD215AC3.pdf>

²³ KREJČÍŘÍK, Alexandr. Chlazení SSR. *Solid State relé*. 1. vydání. Praha: BEN, 2002, s. 83. ISBN 80-7300-081-4.

$$K_{t \text{ chladiče}} = \frac{\Delta T_{ch}}{P} = \frac{55,75}{22,5} = 2,4 \text{ K/W} \quad (8)$$

Na Obr. 24 odpovídá křivka 3 černěnému povrchu hliníkového plechu (běžně $d = 2\text{mm}$). Hodnota $2,4 \text{ K/W}$ by tedy vyžadovala plech o rozměrech přes 100 cm^2 . Tento rozměr se bude snižovat s přidáním žebrování a také se zvyšováním proudění okolního vzduchu.



Obr. 24 – Závislost velikosti plochy v cm^2 na teplotním odporu pro 4 různé úpravy hliníku (duralu)²⁴

Aby chladič na SSR relé nemusel být příliš veliký, je výhodné použít nucené chlazení – ventilátor. Ventilátory jsou charakterizovány průtokem vzduchu v jednotkách CFM (*Cubic Feet per Minute*), avšak vliv ventilátoru nebo obecně proudícího vzduchu na chladič je charakterizován pomocí jednotky LFM (*Linear Feet per Minute*), což je pouze přepočtené CFM na jednotku plochy (*feet*).

Při dalších výpočtech budeme uvažovat ventilátor SUNON GM0504PEV2-8 s rozměry $40 \times 40 \times 6 \text{ mm}$ a CFM 5,5.

Při přepočtu využijeme znalosti, že 1 mm odpovídá $0,00328 \text{ ft}$. Plochu vypočítáme pomocí známého vztahu pro kruh - $S = \pi \cdot r^2$:

$$S = \pi \cdot 0,0656 = 0,0135 \text{ ft}^2 \quad (9)$$

²⁴ FUKÁTKO, Jaroslav, Tomáš FUKÁTKO a Jiří ŠINDELKA. *Teplo a chlazení v elektronice*. 1. vydání. Praha: BEN, 1997, s. 25. ISBN 80-86056-24-4.

$$LFM = \frac{5,5}{0,0135} = 406,8227 \quad (10)$$

Protože hodnota 406,8227 LFM platí při ideálním proudění vzduchu a nulovém odporu za ventilátorem, je vhodné ji zmenšit - například na 80 %. Výsledná hodnota LFM tedy bude:

$$LFM = 325,4581 \quad (11)$$

Pro výsledné ovlivnění teplotní impedance chladiče ventilátorem použijeme Tab. 7, kde pro námi vypočítanou hodnotu LFM vyjde faktor přizpůsobení teplotní impedance chladiče 0,439.

Tab. 7 – Přizpůsobení teplotní impedance pro různé hodnoty LFM²⁵

LFM	Faktor přizpůsobení teplotní impedance
100	0,757
200	0,536
300	0,439
400	0,378
500	0,338
600	0,309
700	0,286
800	0,268
900	0,252
1000	0,239

Z toho vyplývá, že použití ventilátoru o průměru 40 mm s průtokem vzduchu 5,5 CFM zlepší teplotní impedanci více než 2x. V rovnici (8) je vypočítána konstanta, kterou by chladič neměl překročit, aby SSR relé pracovalo v požadovaném rozmezí teplot. Po přidání nuceného chlazení se tato konstanta změní:

$$K_t = \frac{K_t \text{ chladiče}}{f_{th}} \quad (12)$$

$$K_t = \frac{2,4}{0,439} = 5,4669 \text{ K/W} \quad (13)$$

Jak již bylo zmíněno, teplotní impedance K_t udává nepřímou mírou schopnost odvést teplo. Použitý chladič musí mít tuto konstantu pro správnou

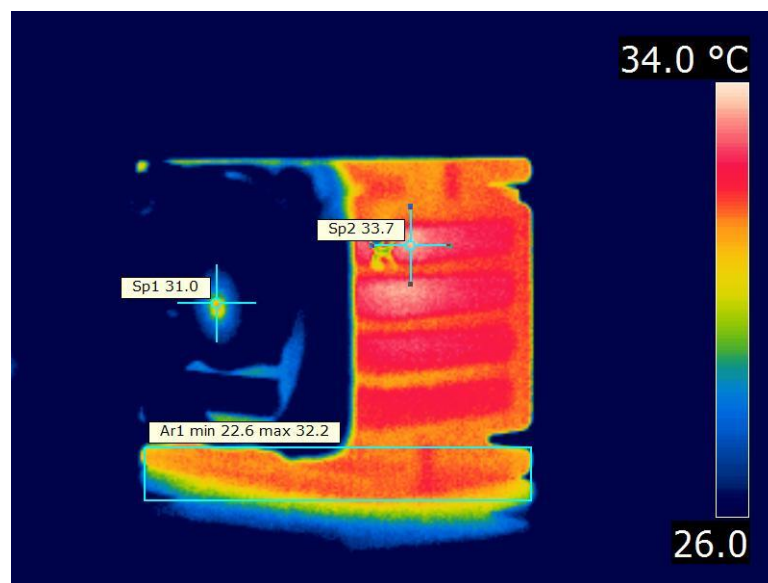
²⁵ CRYDOM INC. *The Effect of Forced Air Cooling on Heat Sink Thermal Ratings*. San Diego, 2011. Dostupné z: http://www.crydom.com/en/Tech/Whitepapers/HS_WP_FA.pdf

funkčnost nižší než 5,4669 K/W. Pro zlepšení tepelné vodivosti mezi pouzdem součástky a chladičem je vhodné použít teplovodivou pastu.

5.2. Ověření návrhu chladiče

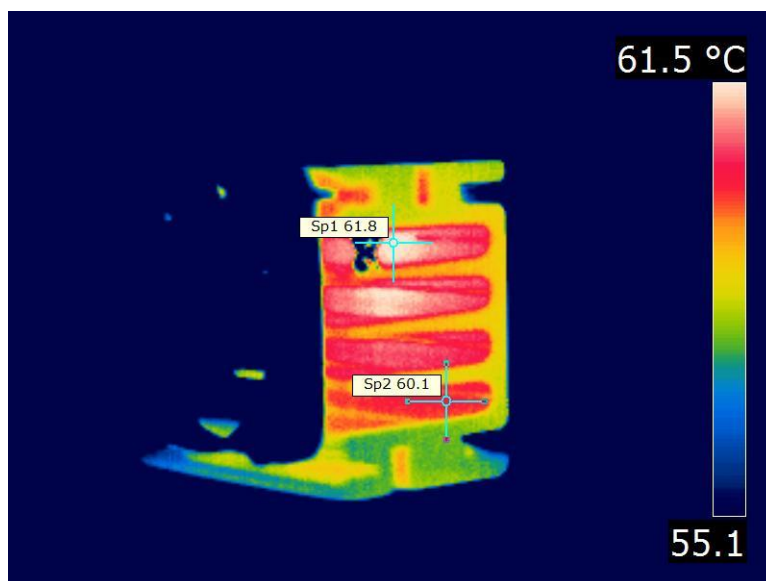
Protože chlazení SSR je velice důležité, byly provedeny i zkoušky uvedených výpočtů. Zkoušky byly prováděny pomocí přenosného radiátoru o příkonu 1600 W a střídou 100 %, to znamená plně sepnutým SSR. Hodnota 1600 W byla volena tak, že většina topných těles v bojlerch nepřesahuje příkon 2 kW.

Na Obr. 25 je provedena zkouška se zapnutým aktivním chlazením (ventilátorem), takže je patrné, že teplota chladiče nepřesahuje 34 °C, což je velice dobrá hodnota. Je patrné, že žebrování chladiče odvádí teplo směrem od součástky.



Obr. 25 - Ověření chlazení SSR (s ventilátorem)

Obr. 26 naopak zachycuje ten samý chladič s tou samou zátěží, ale bez zapojeného ventilátoru. Maximální teplota je o něco málo nižší než dvojnásobek oproti měření s ventilátorem, což je podpořeno také výpočtem.



Obr. 26 - Ověření chlazení (bez ventilátoru)

Pro lepší kontrast obrázků je zvoleno při každém měření jiné měřítko, ale protože je na měřeních zobrazena stupnice, jsou mnohem přehlednější.

6. Úpravy schématu a DPS pro zlepšení vedení a spolehlivost

6.1. Návrh z hlediska vyzařování

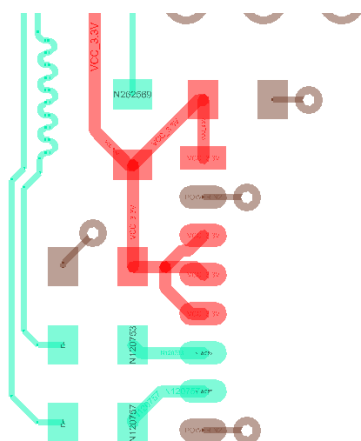
S rozvojem elektroniky se zvyšuje i rušení elektronických zařízení navzájem. Abychom toto ovlivňování minimalizovali, je vhodné na něj myslet už při návrhu zařízení. Každé elektronické zařízení se svým způsobem chová jako zdroj rušení s anténou a na druhou stranu jako anténa a přijímač rušení. Je tedy vhodné dodržet několik pravidel, aby se vyzařování minimalizovalo.

Jedním z hlavních pravidel při návrhu dvouvrstvé desky plošných spojů je snažit se o to, aby co nejvíce spojů bylo pouze v jedné vrstvě a v druhé byla pouze rozlitaná měděná plocha – zem (GND) a případné nutné propojky. Připojení na GND se pak realizuje pouze prokovem do druhé vrstvy, čímž se minimalizuje plocha proudové smyčky.

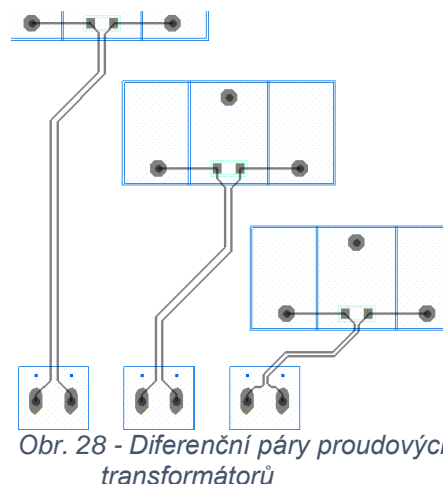
Druhým důležitým aspektem je snažit se umisťovat blokovací kondenzátory co nejbližší k součástce a tím zajistit co nejkratší spojení. S tím souvisí i fakt, že blokovávané napětí je pouze na pinu kondenzátoru a ne na vodiči, ke kterému je kondenzátor připojen.

6.2. Diferenční páry

Diferenční pár je dvojice vodičů, na kterých je informace vyhodnocována pomocí rozdílu napětí. Jejich smysl není tedy vztažen ke GND (uzemnění), ale jeden k druhému. Je tedy žádoucí tyto vodiče na plošném spoji umisťovat co nejbližší k sobě – i z hlediska případného rušení (rušivý signál se naindukují na oba ve stejném smyslu a velikosti). Pro rychlé signály je také nutné zaručit jejich stejnou délku, protože v každý časový okamžik musí být informace v určité délce jednotná.



Obr. 27 - Diferenční pár USB



Obr. 28 - Diferenční páry proudových transformátorů

Na Obr. 27 je znázorněn diferenční pár mezi oddělovacím čipem a mikroprocesorem. Jak je patrné, dvě výše uvedené vlastnosti jsou při navrhování použity – vodiče jsou blízko u sebe a viditelný meandr na vodiči D+ je pro kompenzaci délky. Obr. 28 přináší pohled na desku plošných spojů proudových transformátorů. Protože ani jeden ze signálů vycházejících z měřicích členů není spojen se zemí, můžeme i tyto spoje považovat za

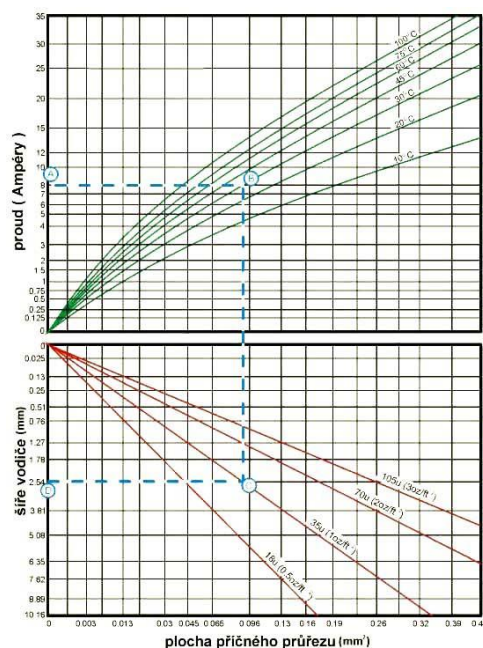
diferenční páry, a proto jsou umístěny blízko u sebe. Jejich délka není kompenzována, protože z hlediska rychlosti signálu, který je po nich veden, není rozdíl markantní.

6.3. Chlazení stabilizátoru

Podobně jako u ztrátového výkonu na polovodičovém relé i ztrátový výkon na stabilizátoru je potřeba chladit. Při mém návrhu používám napájecí transformátor, který má sekundární napětí 15 V. Z něj jsou napájeny stabilizátory na 12 a 3,3 V. Na stabilizátoru 7812R (12-ti voltový je úbytek napětí 2 V, při jeho maximálním zatížení 1 A je ztrátový výkon 2 W). Pro stabilizátor na 3,3 V je uváděný „dropout“ 1V a při maximálním zatížení 0,8 A je ztrátový výkon 0,8 W. Oba tyto výkony je nutné chladit. Protože jsou použity SMD součástky, je nutné „chladič“ vytvořit rozlitou plochou. Čím bude plocha větší, tím bude zajištěn lepší odvod.

6.4. Měděné plochy pro vyšší proudy

SSR relé a magnetické relé jsou dimenzovány pro spínání 15 A, respektive 16 A. Stejně jako měděný vodič i měděná cesta má určitý odpor a protékajícím proudem se zahřívá. Je tedy nezbytné pro proudově náročnější součástky dimenzovat šířku spojů tak, aby dané zatížení byly schopné vydržet.

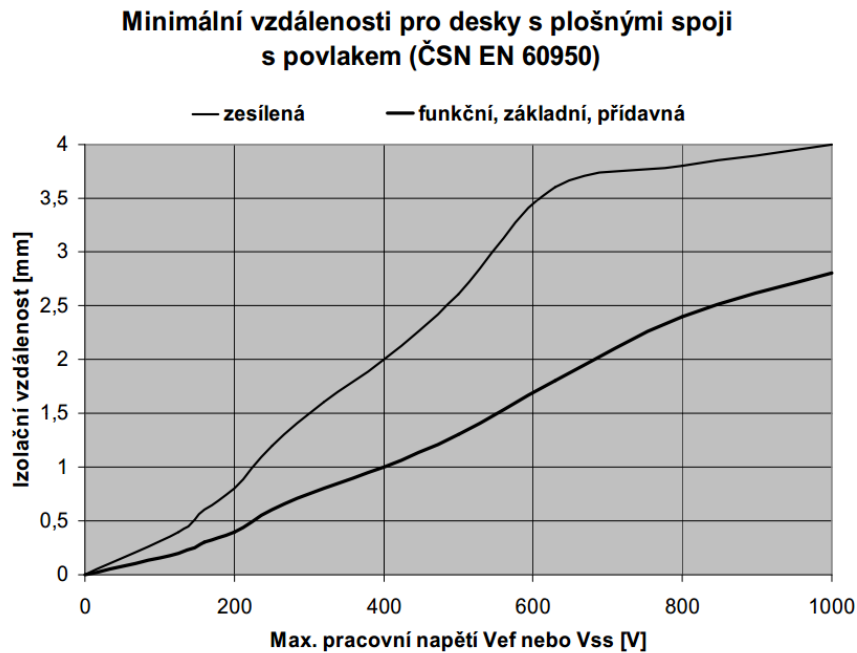


Obr. 29 - Maximální proudové zatížení vodiče v závislosti na jeho průřezu a teplotním nárůstu²⁶

Pro navržené součástky, teplotní nárůst maximálně o 30 °C a použití desky s tloušťkou mědi 35 μm, je podle grafu na Obr. 29 nutné pro protékající proud 15 A použít šířku vodiče alespoň 6,35 mm. Aby byla tato podmínka zajištěna, jsou na DPS použity rozlité plochy jak ze strany TOP, tak ze strany BOTTOM plošného spoje.

²⁶ Proudová zatížitelnost vodiče. *Prago Board* [online]. 2012 [cit. 2013-12-25]. Dostupné z: http://www.pragoboard.cz/proudova_zatizitelnost

Protože spínané napětí dosahuje efektivní hodnoty 230 V, je normou také upravena izolační vzdálenost. Pro síťové napětí 230 V vychází tato vzdálenost 0,5 mm, vezmeme-li v úvahu zesílenou, je přibližně dvojnásobná – viz Obr. 30.



Obr. 30 - Izolační vzdálenosti pro DPS podle pracovního napětí²⁷

6.5. Ochrana SSR relé²⁸

Polovodičová relé jsou na rozdíl od mechanických náchylnější k různým druhům poškození:

- připojení nevhodného vstupního (řídícího) napětí
- připojení nevhodného výstupního napětí
- připojení nevhodné velikosti vstupního napětí
- připojení nevhodné velikosti výstupního napětí, resp. proudu
- připojení indukční zátěže (resp. jejím rozpínáním)
- nadměrná velikost du/dt , di/dt na výstupu SSR

Ve svém řešení jsem použil pouze ochranu varistorem, který je připojen paralelně ke svorkám polovodičového relé. Pro síťové napětí 230 V je vhodné použít varistor s napětím 250 V.

6.6. Zvětšení ploch kolem krystalů

Z prostorového hlediska jsem byl nucen umístit krystalové oscilátory pro měřicí čipy CD5490 z horní strany, na které je po celé ploše (vyjma prokovů, krátkých propojek a vývodových součástek) rozlita měď (GND). Aby se zlepšila

²⁷ IZOLAČNÍ VZDÁLENOSTI NA PLOŠNÝCH SPOJÍCH. In: *Přednášky předmětu A0B34PPN: Ing. Vít Záhlava, CSc.* [online]. 2013 [cit. 2013-12-25]. Dostupné z: http://www.micro.feld.cvut.cz/home/zahlava/ppn/prednasky/vlastnosti_DPS.pdf

²⁸ KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Solid State Relé*. Praha: BEN, 2002, s. 78-82. ISBN 80-7300-071-4.

impedance, jsou kolem těchto třech krystalů zvětšené izolační plochy vůči již zmíněné měděné ploše země.

6.7. Prokovy pro RTC a SD kartu

Abych „ušetřil“ místo na desce plošných spojů, jsou obvody pro hodiny reálného času (RTC) a pro SD kartu realizovány na samostatných DPS, které se následně kolmo připájejí na „základní“ desku. Protože je předpokládáno určité mechanické namáhání – např. při výměně baterie pro RTC či paměťového média, jsou SMD piny pro připájení, jak na „základní“ desce, tak na deskách, které se k ní připojují, opatřeny prokovy pro zvýšení mechanické odolnosti proti odtržení měděné vrstvy od vrstvy nosného laminátu.

7. Software

7.1. Kalibrace měřicích čipů

Hlavní kalibrační smyčka (Obr. 34) slouží pro přizpůsobení všech registrů hardwarovému řešení. Skládá se z kalibrace zesílení, kalibrace AC, případné kalibrace DC, výkonové a fázové kompenzace - všechny zmíněné jsou níže podrobněji popsány.

Před kalibrací je nejprve čip CS5490 resetován pomocí resetovacího pinu, který je „přidržen“ na logické nule po dobu delší než 128 ms. Poté je vyslána instrukce pro jeden převod. Protože není použita Rogowského cívka a měřen je střídavý proud a napětí, je zapnut vysokofrekvenční filtr. V dalším kroku se rozhoduje, zda je k dispozici maximální napětí a proud, které dovoluje HW návrh. Spustí se kontinuální převod, přečtou se důležité registry (I_{rms} , V_{rms} , P_{avg} , Q_{avg} , PF) a zastaví se konverze. Po nastavení počtu vzorků (počet vzorků, přes který se průměruje) a času ustálení (čas po resetu a započítí převodu pro ustálení filtrů) dojde k provedení vlastních kalibrací a na závěr uložení důležitých kalibračních konstant. Toto se provádí pouze při výrobě a ne při vlastním používání zařízení. Hlavní kalibrační smyčka je na Obr. 34.

7.1.1. Kalibrace zesílení

Kalibrace zesílení přizpůsobí registry pro konkrétní hardwarové řešení (jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, měřicí čip CS5490 neměří přímo napětí a proudy pro výpočty výkonů, ale měří jejich poměrnou hodnotu na odporových můstcích). Tento typ kalibrace je možné provést dvěma způsoby podle použitého rozsahu vstupních veličin. Z hlediska měření je vhodnější použít kalibrování pomocí maximálních hodnot pro navržený systém – připojením maximálního napětí a proudu. Pokud se použijí hodnoty nižší než maximální²⁹, je nutné před spuštěním upravit hodnoty v registrech I_{GAIN} a V_{GAIN} podle rovnic (14) a (15).

$$V_{GAIN} = \frac{V_{MAX}}{V_{REF}} \cdot 2^{22} \quad (14)$$

$$I_{GAIN} = \frac{I_{MAX}}{I_{REF}} \cdot 2^{22} \quad (15)$$

V_{GAIN} a I_{GAIN} hodnota uložená v registru

V_{MAX} , I_{MAX} – maximální hodnoty dané HW návrhem

V_{REF} , I_{REF} – hodnota napětí/ proudu přivedená na měřicí vstupy

Kalibrační proces se skládá z těchto bodů:

- přivedení napětí/proudu
- při nižším napětí/proudu nastavit registry V_{GAIN} a I_{GAIN}
- vyslání kalibrační instrukce
- po kalibraci je měřicí přístroj nastaven pro měření V_{REF} , I_{REF}

²⁹ Je vhodné použít alespoň 1/2 maxima rozsahů

Po kalibraci zesílení budou hodnoty v registrech pro maximální vstupní napětí a proud odpovídat hodnotě 0,6 pro V_{RMS} a I_{RMS} , 0,36 pro P_{AVG} při účinníku 1, 0,36 pro Q_{AVG} při účinníku 0 a 0,36 pro zdánlivý výkon.

7.1.2.AC offset kalibrace

Kalibrace pro střídavé signály je nutná pouze v případech, kdy je vyžadována přesnost při nízkých úrovních signálu. Vývojový diagram je na Obr. 35.

7.1.3.DC offset kalibrace

Stejnoseměrná kalibrace je navržena pro odstranění DC složky z výstupu A/D převodníku. Není tak často používána pro měření AC signálů. Pro měření střídavých signálů je doporučeno možností³⁰ použití horní-propustného filtru. Pro doplnění je vývojový diagram této kalibrace znázorněn na Obr. 36.

7.1.4.Výkonová kompenzace

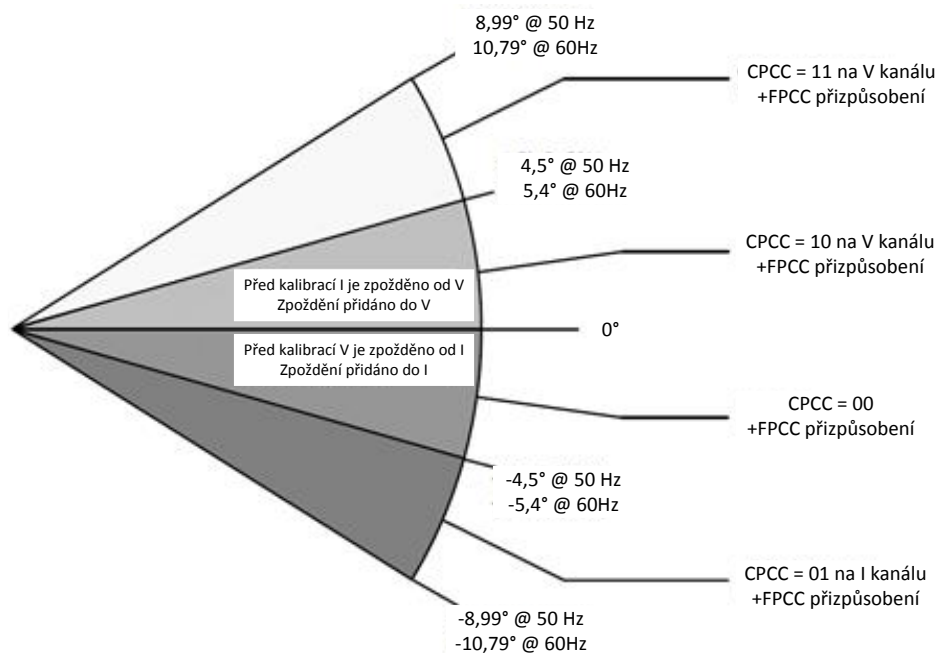
Měřicí čip CS5490 umožňuje provést kompenzaci výkonu bez připojené zátěže. Důvodem je možnost offsetů v registrech, které měří P_{AVG} (činný výkon) a Q_{AVG} (jalový výkon). Aby se tato chyba minimalizovala, je nutné provést následující:

- připojit maximální napětí
- odpojit zátěž (proud)
- spustit kontinuální převod
- vyčíst P_{AVG} a Q_{AVG} registry
- zapsat $-P_{AVG}$ a $-Q_{AVG}$ do P_{OFF} , resp. Q_{OFF} registrů

7.1.5.Fázová kompenzace

Fázová kompenzace přizpůsobuje fázové rozdíly mezi napětím a proudem. Nastavením zpoždění proudu oproti napětí o 60° (střed cosinu v rozmezí 0° a 90°) dovoluje lépe rozlišit případné fázové zpoždění a kompenzovat ho. Fázovou „chybu“ je možné kompenzovat v případě, že spadá do rozmezí $\pm 8.99^\circ$. Obr. 31 znázorňuje možnosti kompenzace. Průběh kompenzace je znázorněn na Obr. 38.

³⁰ <http://www.cirrus.com/en/pubs/appNote/AN366REV2.pdf>, strana 8, odstavec 4.1.1



Obr. 31 – Omezení fázové kompenzace

Kompenzace probíhá následovně:

- přivést napětí a proud zpožděný o 60°
- spustit kontinuální převod
- načíst PF registru a výpočet:

$$\text{acos}(\text{register PF}) - 60^\circ$$
- provést výpočet fázové kompenzace (PC) pro 4,096 MHz krystal:

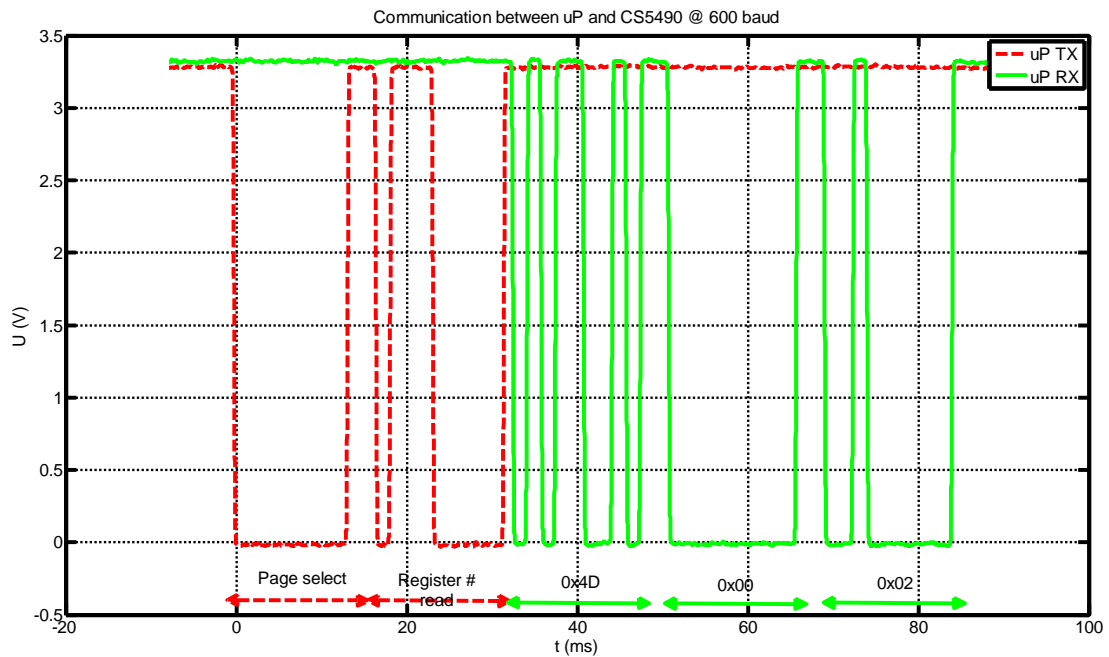
$$50 \text{ Hz: PC registr} = \text{fázová chyba} / 0,008789$$

7.1.6. Příklad čtení registru CS5490

Obr. 32 ukazuje komunikaci po rozhraní UART mezi mikrokontrolérem a měřicím čipem CS5490. Komunikace má standardní rámeček, 8 bitů, 1 start a 1 stop bit, bez parity. Posílán je nejprve nejvýznamnější bit z nejvýznamnějšího bytu. Přijata jsou data 0x40, 0x00, 0x02, která po „otočení“ (MSB vysláno nejdříve) odpovídají 0x02 00 40. Rychlost komunikace je umístěna pouze ve spodních dvou bytech a po převedení pomocí vzorce (16) vyjde přečtený baud rate 600.

$$\text{BaudRate} = \text{BR}[15:0] \times \text{MCLK} / 524288 \quad (16)$$

MCLK je frekvence připojeného oscilátoru.



Obr. 32 - Ukázka komunikace při kalibraci (čtení baud rate)

7.2. Hlavní program

Obr. 33 znázorňuje vývojový diagram startu celého systému – tedy operací, které nastávají ihned po připojení zařízení k napájecí síti. Po připojení mikroprocesoru k napájení dojde k jeho vlastní inicializaci, včetně zamknutí fázově řízeného generování hodin z externího krystalového oscilátoru. Na tuto „událost“ se čeká a pokud nenastane, není spuštěn zbytek programu, protože z hlediska stability by nebyla činnost systému deterministická. Poté se inicializují porty (vstupní a výstupní), s tím spojené jejich úrovně po startu (*pull-up*, *pull-down*) a s těmito úrovněmi související přerušení (na náběžnou, sestupnou, nebo obě hrany). Tato přerušení jsou využívána na většinu událostí přicházejících z vnějších obvodů – 1 Hz signál od RTC, vložení/vyndání SD karty apod.

Dojde k nastavení FIFO front (celkem 4), pro uložení příchozích UART komunikací – každý UART má přerušení na příchozí data, jakmile toto přerušení nastane, je přijatý byt vložen do fronty, která má velikost 32 bytů. Tyto fronty poskytují informace o své zbylé velikosti, zda jsou prázdné, a samozřejmě funkce pro vložení a vybrání prvku.

Vývojový diagram je uzpůsoben již pro případné rozšíření konfigurace pomocí USB, takže je rozšířen o režim nastavování. Po přechodu do tohoto režimu se v první řadě vypnou všechna přerušení, aby proces nastavování nebyl přerušován v nevhodný čas při výkonu instrukcí, které musí být provedeny následně po sobě v určitém intervalu. Poté se čeká na instrukci, která určí, co se bude nastavovat.

Pro měření a regulaci platí Obr. 39. Na začátku dojde k softwarovému resetu pomocí příslušné instrukce, která obnoví všechny registry do výchozího stavu. Protože tento reset ovlivní i registry, které byly nastaveny při výše popsaných kalibracích, je nutné tyto hodnoty načíst a obnovit z NVM paměti -

registry se zesíleními, offsety a kompenzacemi nulových výkonů. Poté se spustí jeden převod a vyhodnotí se hodnota kontrolního součtu, které čipy CS5490 poskytují – tento součet je kontrolním součtem všech řídicích registrů a slouží tedy k ověření, že všechny přenastavené hodnoty registrů jsou nastaveny stejně jako v konfiguraci, kdy byl kontrolní součet uložen. Vymazání bitu DRDY (data ready) následuje zapnutím kontinuálního převodu a spuštěním celého běhu měření a regulace.

Tento běh je iniciován 1 Hz přerušením od hodin reálného času. Přerušení spustí vyčtení hodnot ze všech měřicích čipů (především hodnoty P_{avg}). Protože hodnoty v registrech nejsou uloženy v BCD formátu, je nutné tuto hodnotu převést na dekadický formát, se kterým se dále lépe pracuje. Příklad takového registru je v Tab. 8, kde registr nabývá hodnot od -1 do 1.

Tab. 8 - Příklad registru P_{avg} , strana 16, adresa 5

MSB											LSB	
$-(2^0)$	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-4}	2^{-5}	2^{-18}	2^{-19}	2^{-20}	2^{-21}	2^{-22}	2^{-23}

Rovnice (17) ukazuje přepočtení registru P_{avg} na dekadické číslo.

$$P_{avg(dec)} = -MSB \frac{1}{2^{23} - 1} P_{avg(reg)} \quad (17)$$

Pomocí rovnice (18) pak určíme skutečný výkon. $P_{AVG(dec)}$ je hodnota registru v dekadickém formátu, P_{MAX} je maximální výkon daný hardwarovým návrhem (napětí vynásobené proudem).

$$P_{avg} = \frac{P_{avg(dec)} \cdot P_{MAX}}{0.36} \quad (18)$$

Po převedení všech třech měřených výkonů jsou tyto hodnoty sečteny (znaménkově) a toto je výkon, který můžeme spotřebovat (pokud je v kladných hodnotách).

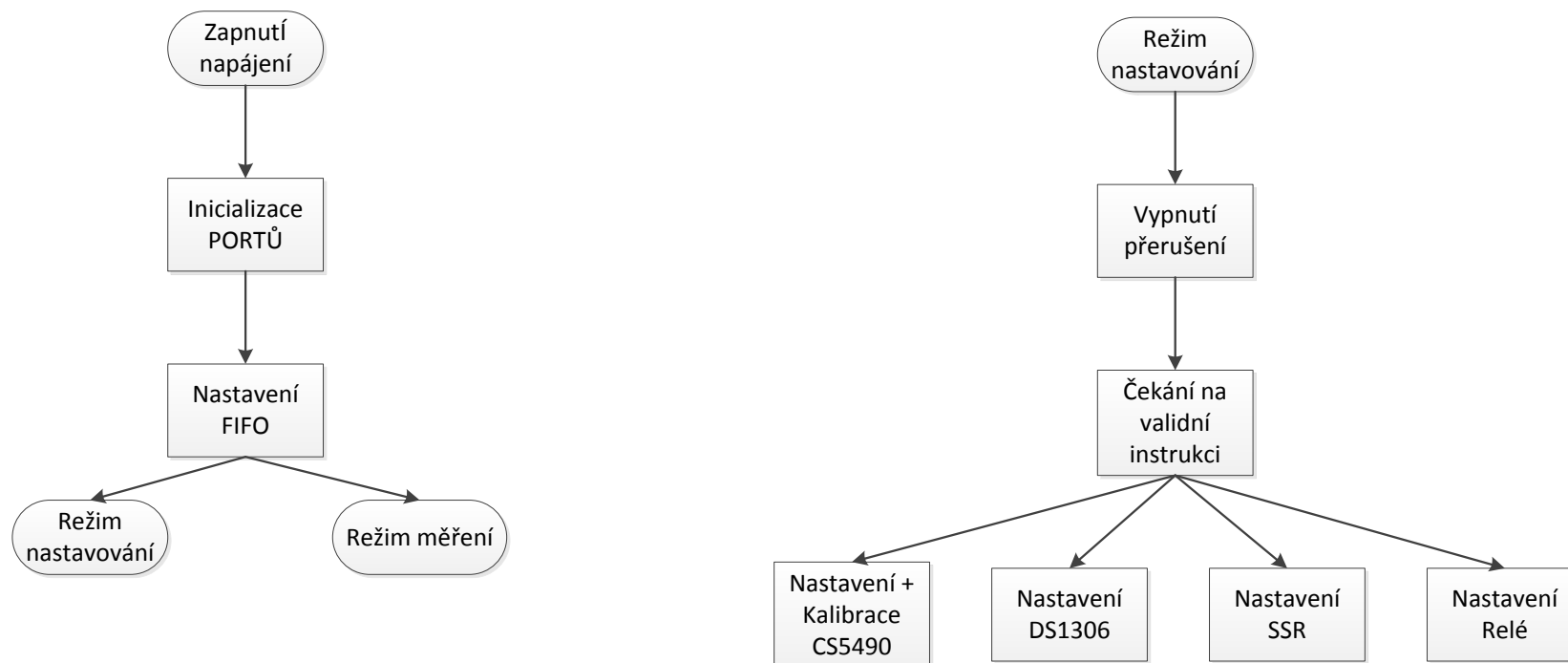
Podle nastavení programu, ve kterém je uveden výkon připojený na SSR se procentuálně určí (na 10 %), jaká bude střída na PWM pro řízení tohoto relé. Program lze dále modifikovat tak, aby byl minimální výkon, který SSR za den do zátěže dodá – aby byla případná voda v bojleru nahřátá každý den a ne pouze ve slunečné dny.

Protože se jedná o řízení energie ze slunce, je nelogické, aby systém běžel v noci. O toto se starají přednastavitelné časy v hodinách reálného času a opět pomocí přerušení zapínají, popřípadě vypínají celý proces řízení.

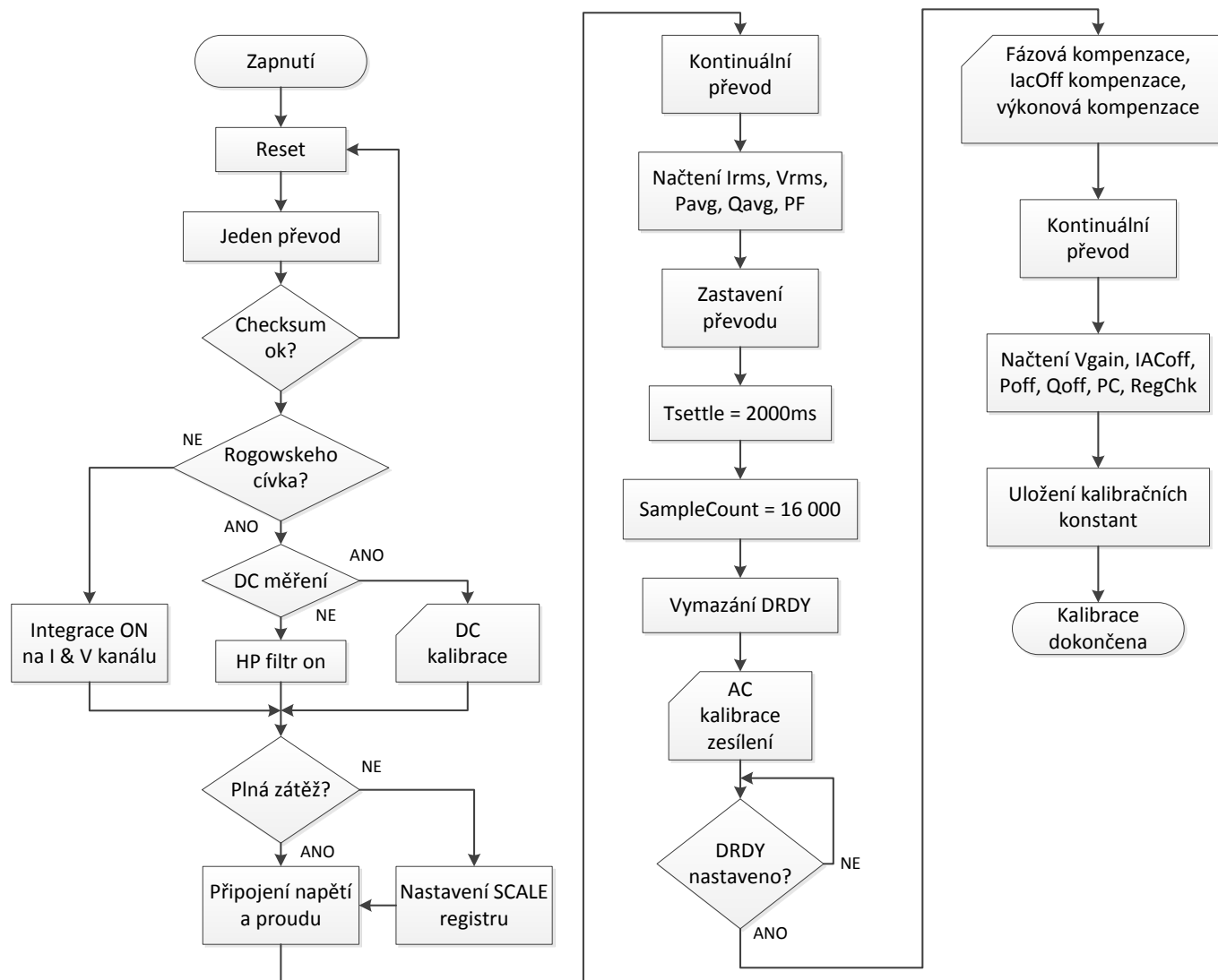
Během každého běhu řízení jsou také zaznamenána naměřená data na SD kartu. Pro každý den je vytvořen jeden soubor a v tomto souboru je pro každý čas uložena naměřená hodnota výkonu a procentuální hodnota PWM pro řízení SSR.

8. Vývojové diagramy

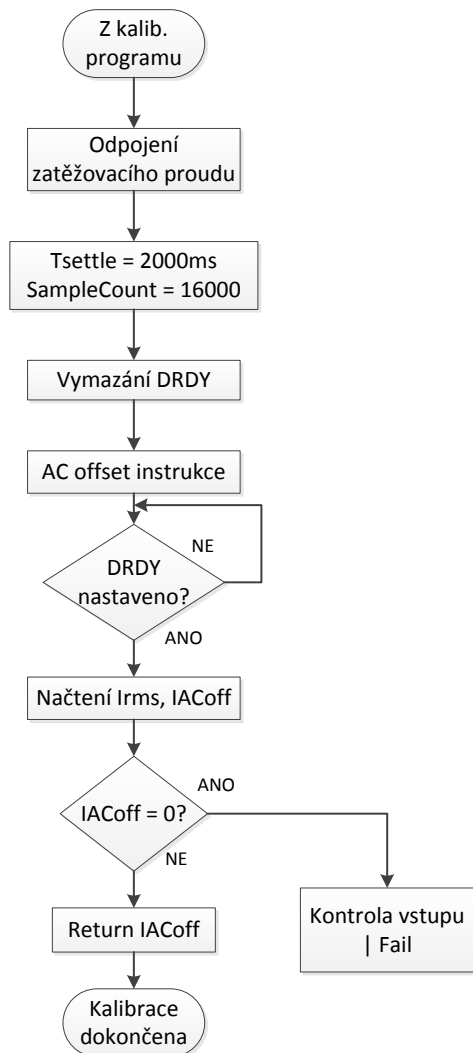
Na následujících 5 stranách jsou zobrazeny vývojové diagramy popsané výše.



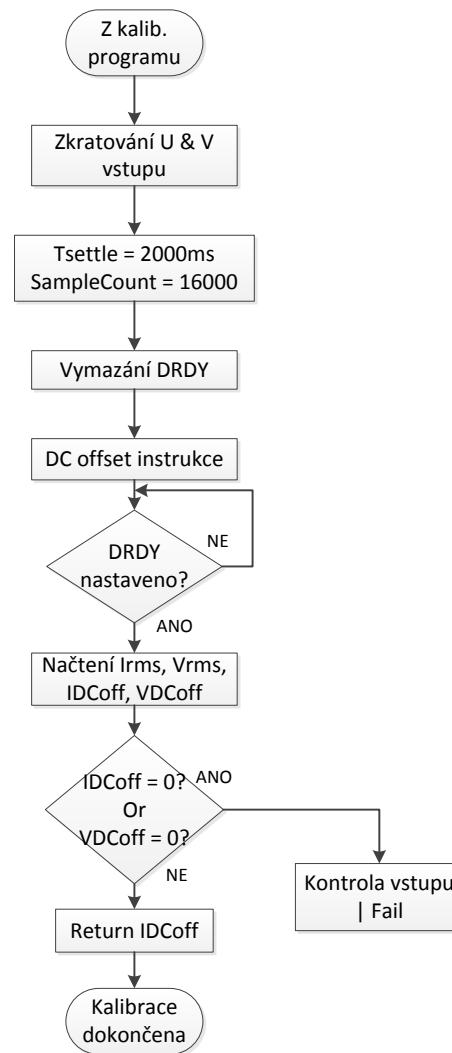
Obr. 33 - Vývojový diagram 1 - Start systému



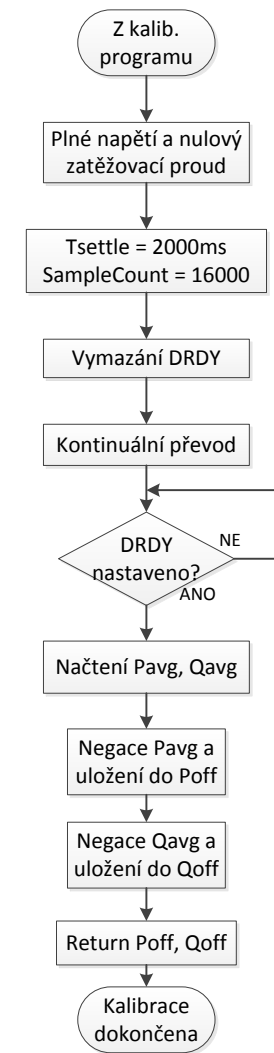
Obr. 34 - Vývojový diagram 2 - Hlavní kalibrační smyčka



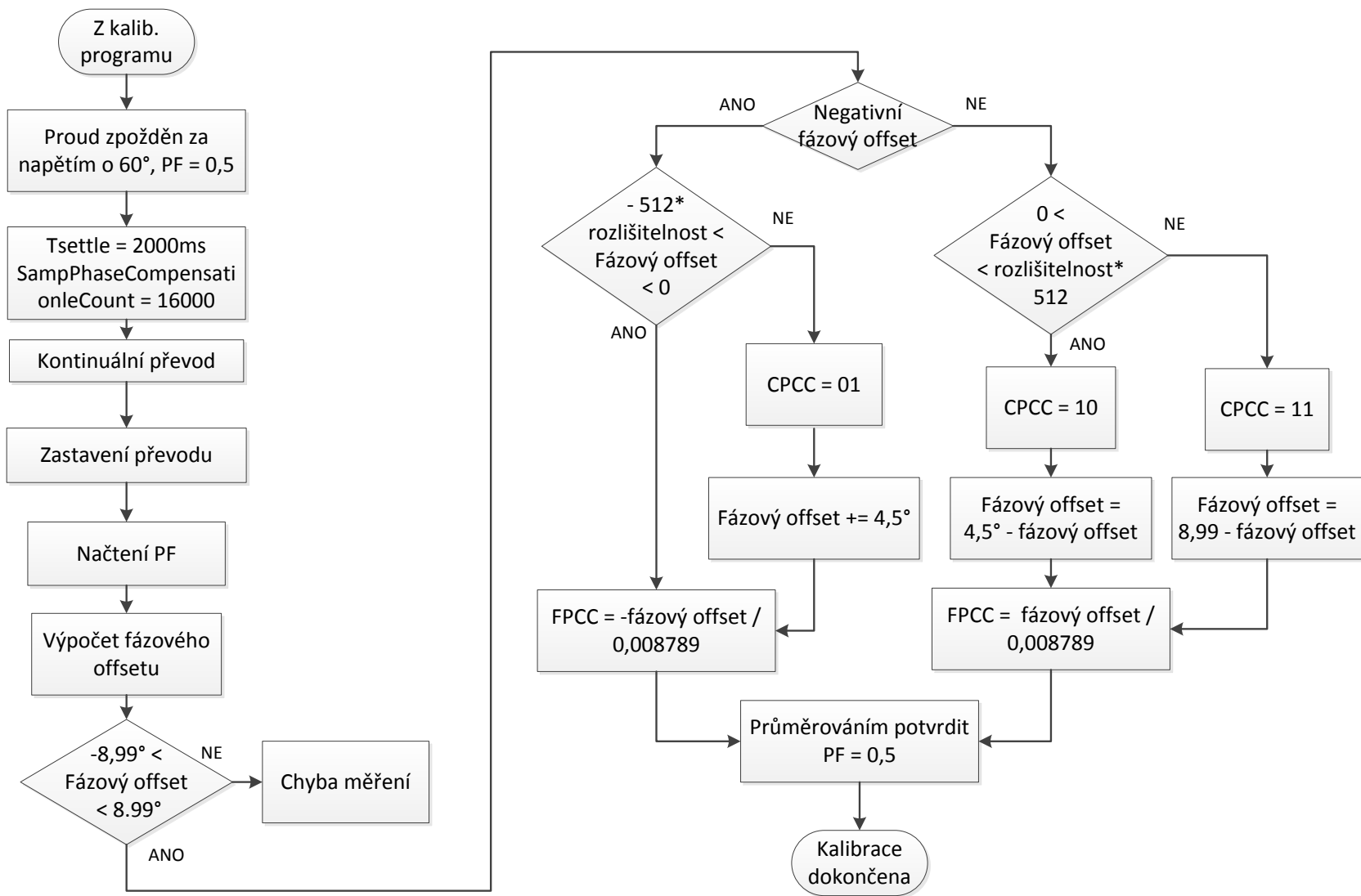
Obr. 35 - Vývojový diagram 3 - AC offset kalibrace



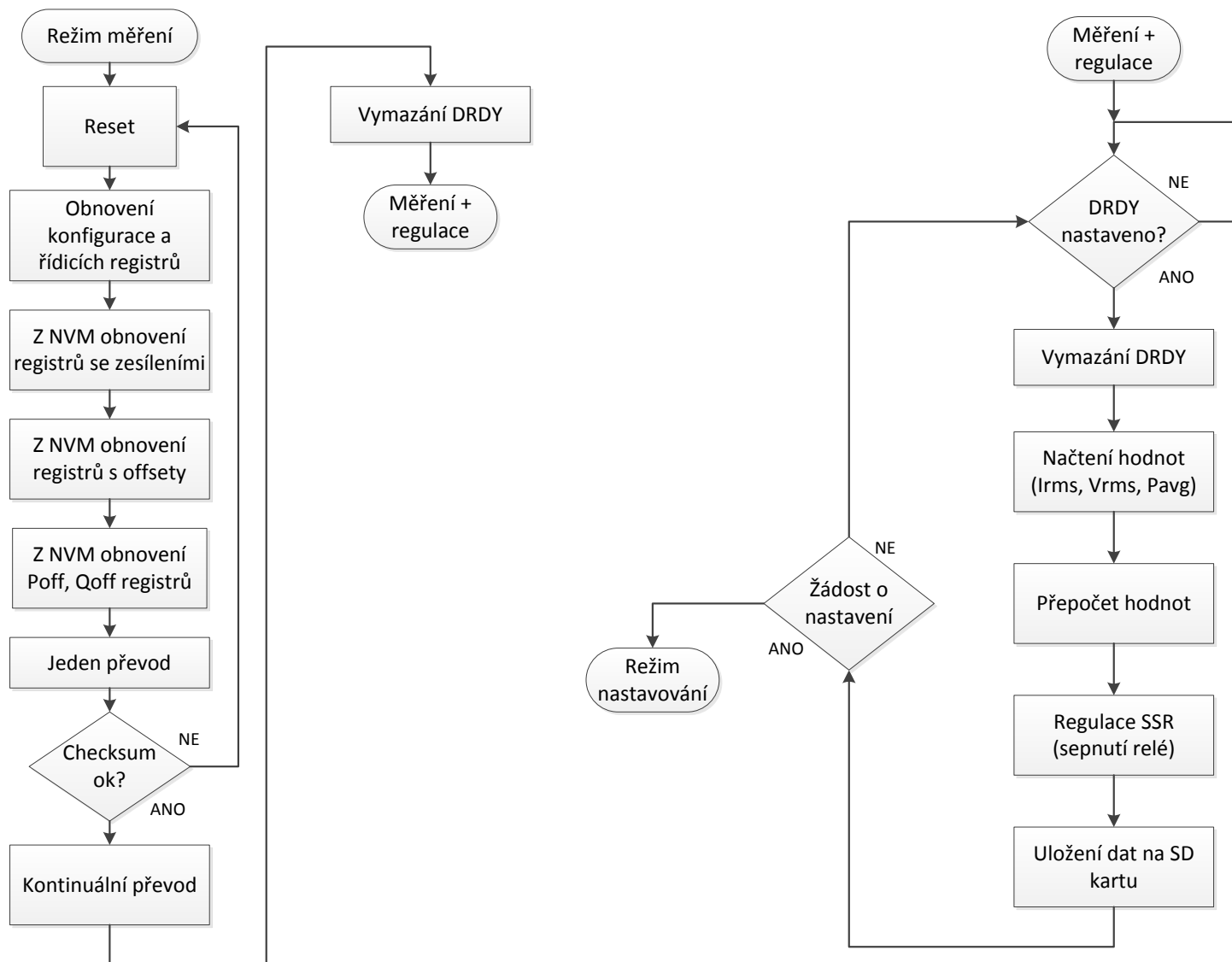
Obr. 36 - Vývojový diagram 4 - DC offset kalibrace



Obr. 37 - Vývojový diagram 5 - No load kalibrace



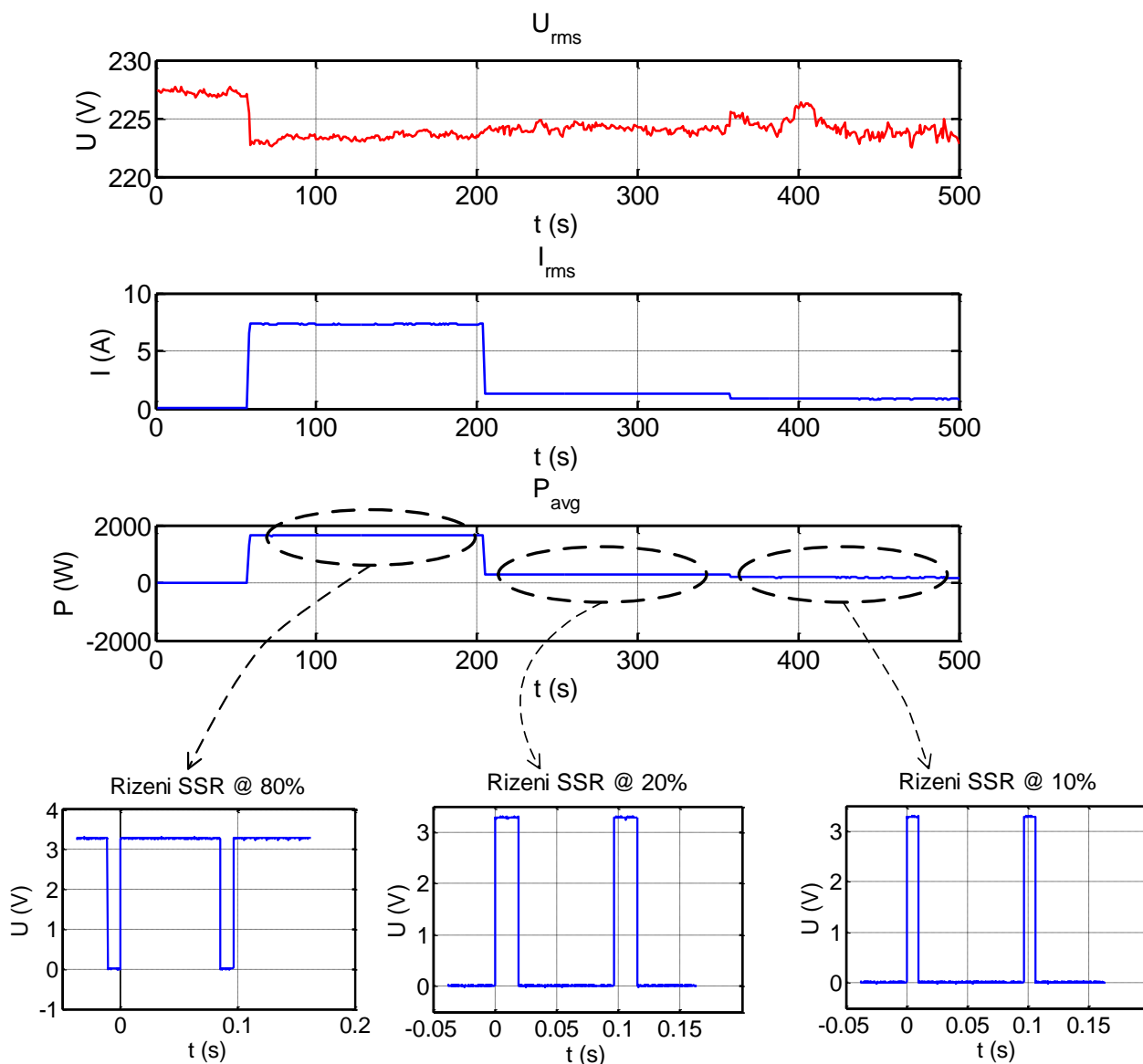
Obr. 38 - Vývojový diagram 6 - Fázová kalibrace



Obr. 39 - Vývojový diagram 7 - Měření a regulace

9. Výsledek práce

Výsledkem je funkční „vzorek“ řízení odporových zátěží pomocí SSR v závislosti na přebytečné vyrobené energii fotovoltaickými články. Celé zařízení se skládá ze dvou modulů – hlavní (řídící) obsahuje veškerou vyhodnocovací, řídicí a záznamovou logiku, druhý menší obsahuje proudové transformátory pro snímání proudu. Oba moduly jsou propojeny pomocí šesti vodičů, nejlépe kroucených (fungují jako diferenční páry), které přenášejí naměřený proud do měřicích čipů.

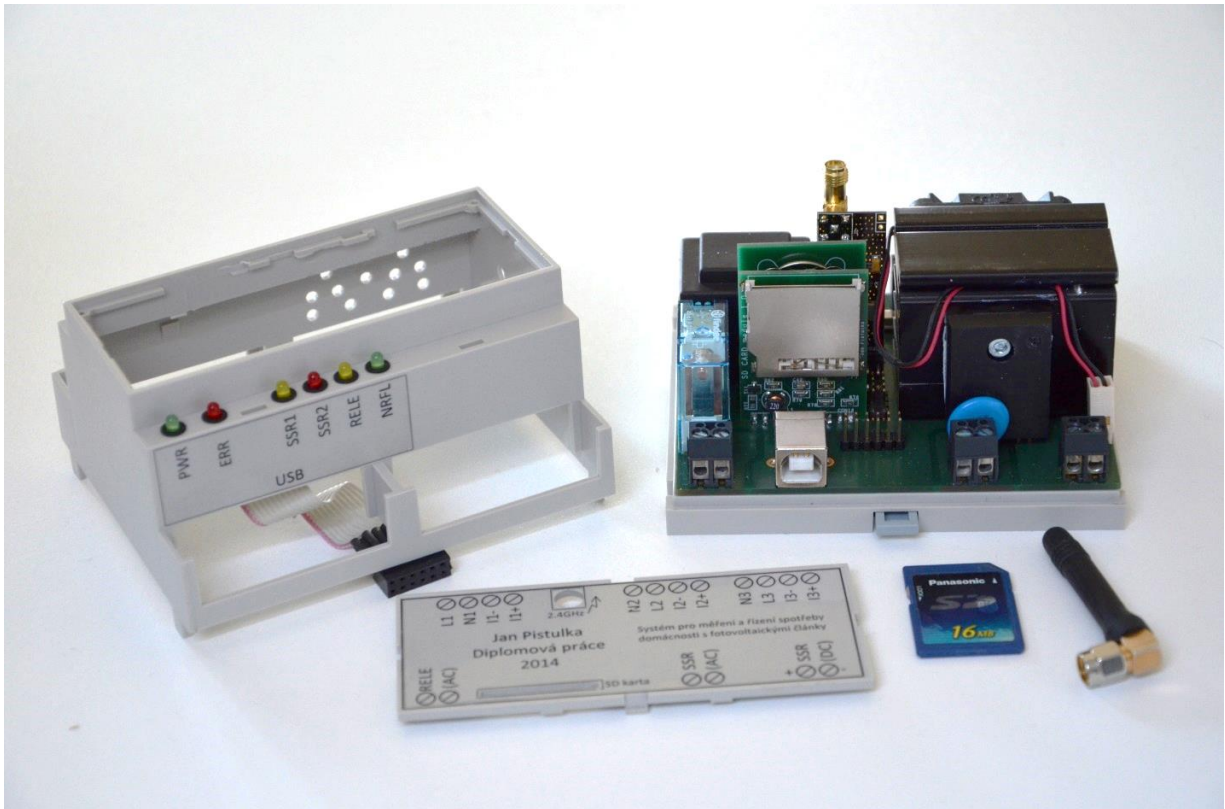


Obr. 40 - Naměřené výsledky

Obr. 40 ukazuje naměřené výsledky – naměřené napětí, proud a výsledný výkon. Ve třech grafech pod těmito veličinami jsou ukázány výstupy z mikročipu pro řízení spínání SSR s příslušnou střídou. Protože výkon do SSR byl nastaven na 2 kW a z průběhu výkonu je patrné, že pro spotřebu je k dispozici přibližně

1670 W, je nastavena střída na 80%. Ve druhé části průběhu je k dispozici přes 350 W a střída pro řízení je nastavena na 20%, v poslední části je přebytek energie 250 W a střída pro tento průběh je 10%.

Na Obr. 41 je ukázána výsledná konstrukce řídicí jednotky odběru. Je navržena tak, aby jej bylo možno umístit do krabičky typu D6MG, která je navržena pro montáž na DIN lištu do rozvaděče. Snímací modul s proudovými transformátory je také navržen do krabičky – D4MG, také pro montáž na DIN lištu do rozvaděče.



Obr. 41 - Obrázek řídicí jednotky odběru s výkem krabičky D6MG

Parametry systému jsou popsány v Tab. 9.

Tab. 9 - Parametry systému

Maximální měřené napětí:	280,5 Vrms	Maximální spínaný proud SSR:	16 A
Maximální měřený proud:	25 A	Maximální spínané napětí SSR:	250 V
		Maximální spínaný proud relé:	15 A
		Maximální spínané napětí relé	400 V

10. Rozšíření návrhu

Protože toto téma přesahuje časové možnosti diplomové práce, uvádím v této kapitole možná rozšíření ke stávajícímu systému. Všechna jsou hardwarově kompatibilní. Software by bylo nutno upravit především implementací podle požadovaných rozšíření.

10.1. Vytvoření konfiguračního programu

Mikročip AtXmega 128A3U obsahuje driver pro USB a celý návrh s ním i „počítá“, bylo by vhodné navrhnout software pro snazší konfiguraci celého systému – od nastavování časů pro zapnutí a vypnutí činnosti systému až po přizpůsobení zapojených zátěží na jednotlivých SSR a elektromagnetickém relé, či čtení záznamů z SD karty.

10.2. Přidání externího SSR

Pro přidání externího SSR relé je na DPS vše připraveno, stačí pouze zvolit vhodný typ tranzistoru pro jeho spínání a podle něj vypočítat hodnoty omezovacích rezistorů do báze a kolektoru. Aby bylo podporováno co největší množství SSR na trhu, bylo zvoleno maximální možné spínací napětí pro externí SSR 12V. Jako příklad možného typu uvádím SSR na Obr. 42, jehož parametry jsou uvedeny v Tab. 10.



Obr. 42 - Příklad externího SSR

Tab. 10 - Charakteristika G3PE-525B

Řídicí napětí	12 - 24 VDC
Spínané napětí	200 - 480 VAC
Maximální zatížení	10 kW
Verze	jednofázová
Hmotnost	0.24kg
Montáž	DIN
Pracovní teplota	-30°C - -80°C

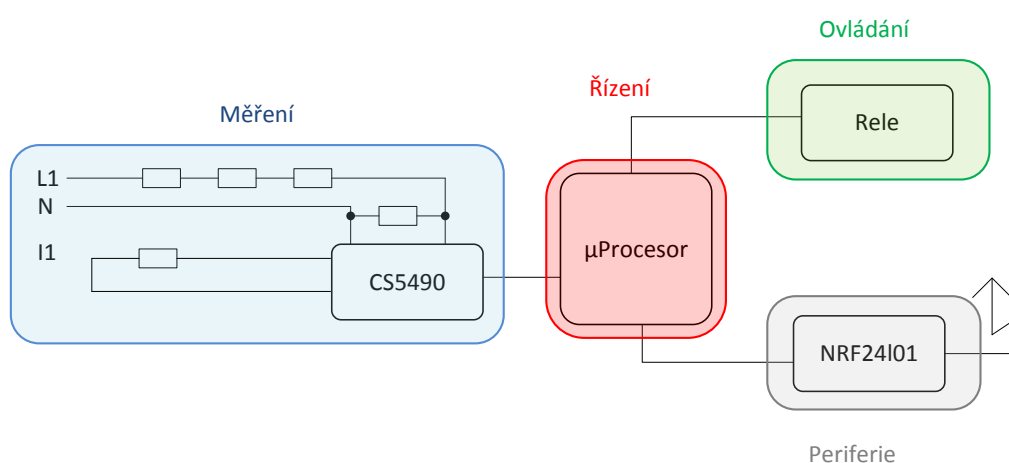
10.3. Rozšíření pomocí bezdrátového rozhraní 2.4 GHz

Systém obsahuje již několikrát zmiňovaný modul pro bezdrátový přenos na frekvenci 2.4 GHz a právě ten umožňuje velké možnosti rozšíření pro stávající systém. Návrhy na případná rozšíření jsou dále rozepsány a doplněny blokovými schématy.

10.3.1. Řízení spínání zásuvky

Základní systém obsahuje „pouze“ 3 možnosti řízení zátěže (2 SSR a elektromagnetické relé). Protože celý systém byl navrhován pro stávající stavbu, kde by bylo problematictější natahování nových vedení z rozvodné skříně, je na Obr. 43 nakresleno blokové schéma dálkového spínání zásuvky.

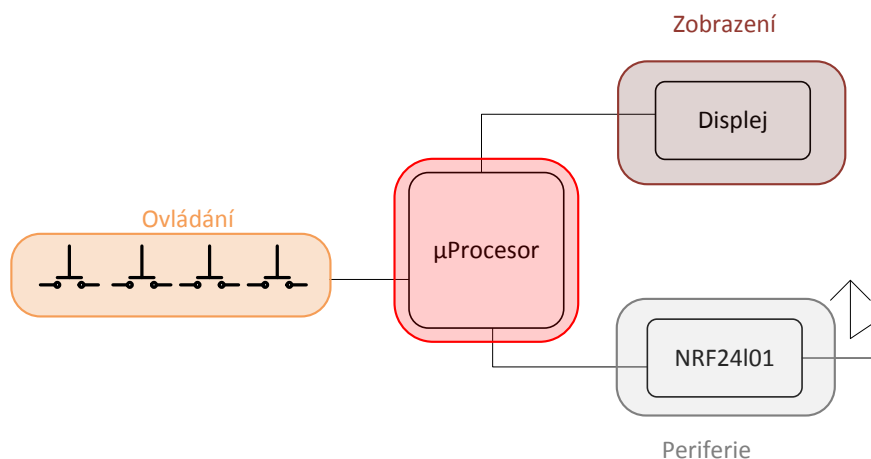
Měření napětí je provedeno stejně jako v návrhu systému, tedy odporovým bočníkem. U snímání proudu je provedena změna – proudový transformátor je nahrazen tzv. „shunt“ rezistorem, což je rezistor o malé ohmické hodnotě s velkou přesností. Tato úprava je provedena pro minimalizaci rozměrů. Ze stejných důvodů je také použito elektromagnetické relé (SSR potřebuje rozměrný chladič). Výsledné řízení zásuvky může být také realizováno „bez inteligence“, tzn. že nebude měřena spotřeba.



Obr. 43 - Návrh rozšíření - dálkové spínání zásuvky

10.3.2. Monitoring a ovládání systému

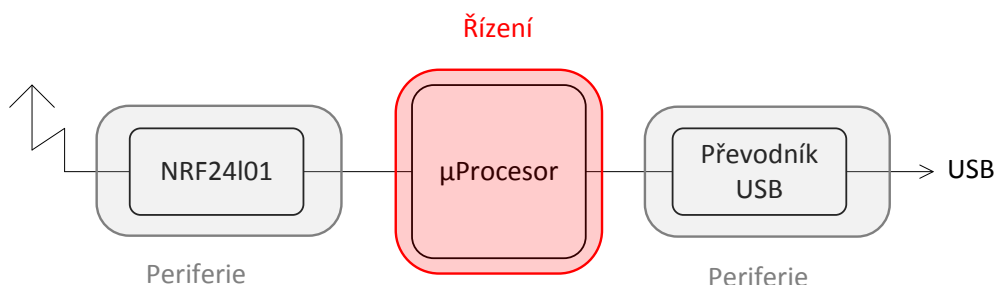
Vždy je uživatelsky velmi příjemné moci sledovat průběh a možnost jej upravit bez nutnosti většího zásahu. Tuto alternativu umožňuje návrh zobrazený na Obr. 44. Jde o velmi jednoduchý přístup ke konfiguraci pomocí displeje s tlačítky opět komunikující na frekvenci 2.4 GHz.



Obr. 44 - Návrh rozšíření - dálkové ovládání a stav systému

10.3.3. Dálkový přístup k systému pro PC

Pro větší konfiguraci a čtení „log“ z SD karty je vhodné blokové schéma na Obr. 45. Jedná se o „převodník“ mezi bezdrátovým rozhraním a USB. Celé zařízení je napájené z USB portu počítače a nevyžaduje žádný externí napájecí zdroj, takže jeho velikost bude o něco větší než flash disk (kvůli rozměru modulu NRF24I01).



Obr. 45 - Návrh rozšíření - přístup pro PC

10.4. Využití vnitřního rozhraní UART

Z hlediska rozšiřitelnosti je UART ideální rozhraní. Pomocí něj je možné propojit mikroprocesory mezi sebou a tím znatelně rozšířit stávající hardwarovou konfiguraci.

11. Závěr

Solární systémy v poslední době zaznamenaly rapidní rozvoj jednak po technologické stránce, ale také z hlediska použití. Jejich mohutný rozmach především v roce 2009 byl zapříčiněn finančními benefity, které nalákaly mnohé investory, a z idey zelené energie se stal byznys. U většiny panelů je deklarována životnost 25 let s garancí maximálního poklesu výkonnosti o 10 % v prvních deseti letech a 20 % do dvaceti let. Od zmíněných finančních dotací se postupně ustupovalo a pro rok 2014 již solární energie není dotována vůbec, protože ekonomika je již nyní zatížena smlouvami z dob „zelené úsporám“. Stále však zůstává druhý faktor kromě finančního - energetická nezávislost a výroba energie pro vlastní potřebu a spotřebu. Technologie je finančně dostupnější, takže i přes absenci finančních dotací je pravděpodobné, že bude výhodné si solární elektrárnu pro svou potřebu pořídit a o to více bude důležité, aby byla efektivně využita vlastní vyrobená elektřina.

Hlavní náplní práce bylo navrhnout a realizovat řízení přebytků energie z fotovoltaických článků pomocí SSR. Celý průběh návrhu je v této diplomové práci popsán od softwarového přes hardwarové řešení a doplněny jsou potřebné údaje pro výpočet chlazení hlavního řídicího členu – SSR. Protože SSR je v řízení zátěže stěžejní, byla mu věnována jedna kapitola, ve které jsou uvedeny obecné charakteristiky těchto spínacích prvků. U softwarového řešení jsou uvedeny také vývojové diagramy a software je přiložen na CD. Veškeré výrobní informace pro desky plošných spojů jsou uvedeny v příloze. Zařízení bylo testováno termovizní kamerou (ověření správného výpočtu chladiče - Obr. 25, Obr. 26) a také osciloskopem pro správné výsledky řízení, které jsou uvedeny na Obr. 40.

Na konci práce jsou uvedena případná další možná rozšíření celého systému doplněná o bloková schémata a stručný popis.

Celé mnou navržené zařízení je schopno regulovat výkon do odporové zátěže s maximálním odběrem 15 A / 230 V. Řízení je prováděno po 10% z maximální hodnoty zátěže (tzn. pro 2 kW je schopno řídit 200 W). Pro umístění do rozvaděče je uzpůsobeno do dvou krabiček vhodných pro montáž na DIN lištu. SD karta se záznamem je přístupná bez otevření krabičky. Pro 2.4 GHz modul je možné připojit externí anténu s konektorem SMA. Zařízení obsahuje také stavové LED diody. Obr. 41 ukazuje řídicí část zařízení.

12. Seznam použité literatury

Bibliografie:

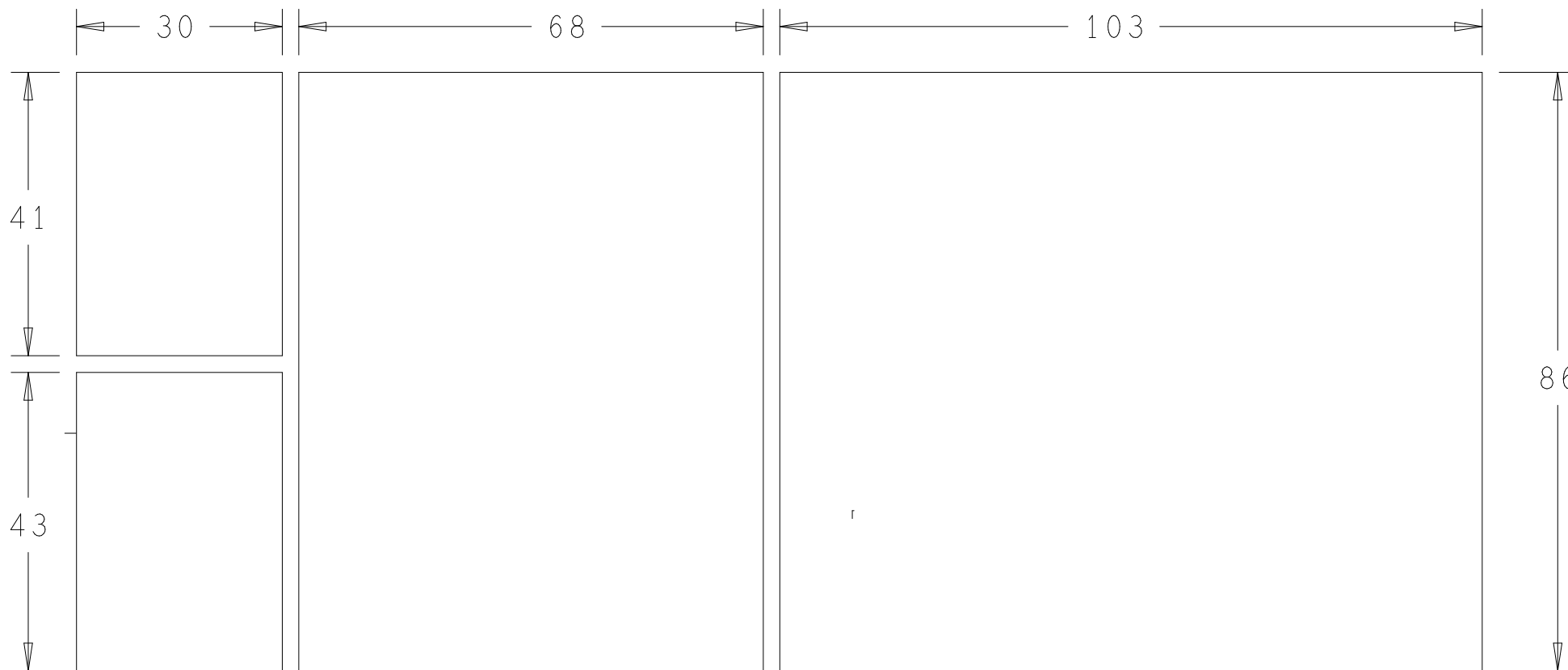
- [1] Skalický, P.: Mikroprocesory řady 8051, BEN, Praha 2002.
- [2] Libra, M., Poulek, V.: Fotovoltaika, BEN, Praha 2009.
- [3] Vedral, J., Fischer, J.: Elektronické obvody pro měřící techniku, ČVUT, Praha 1999.
- [4] Hasselhuhn, R.: Fotovoltaika Budovy jako zdroj proudu, BEN, Praha 2010
- [5] Krejčířík, A.: Chlazení SSR. Solid State relé, BEN, Praha 2002

Internetové zdroje:

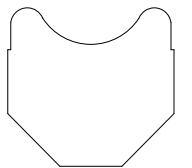
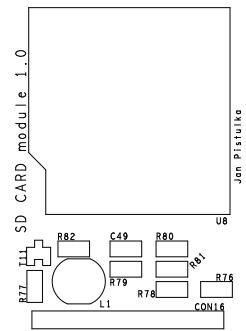
- [6] Solární systém. Zapojení fotovoltaické elektrárny [online]. 2009 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.solarni-system.cz/fotovoltaika/zjednodusene-schema-zapojeni-fotovoltaicke-elektrarny-v-rodinnem-dome>
- [7] Silektro. Výkupní ceny FVE pro rok 2013 [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.silektro.cz/aktuality/vykupni-ceny-fve-pro-rok-2013-49>
- [8] Isofenenergy. Fotovoltaika v podmínkách České republiky [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [9] Isofenenergy. Fotovoltaika v podmínkách České republiky [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [10] Isofenenergy. Fotovoltaika v podmínkách České republiky [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [11] Solarenavi. Vliv orientace střechy na energetický výnos elektrárny [online]. 2012 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/technicke-informace/vliv-orientace-strechy-na-energeticky-vynos-elektrarny/>
- [12] Solární elektrárny v ČR. Solární elektrárny v ČR [online]. 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.elektrarny.pro/>
- [13] EnergoStat. Aktuální data [online]. 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://energostat.cz/elektrina.html>
- [14] ASB-portal. In: TRENDY VE FOTOVOLTAICE [online]. 2013 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/trendy-ve-fotovoltaice>

[15] Silektro. In: Solar3D [online]. 2013 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z:
<http://www.silektro.cz/aktuality/solar3d-zmeni-novy-typ-solarniho-clanku-budoucnost-fotovoltaiky-44>

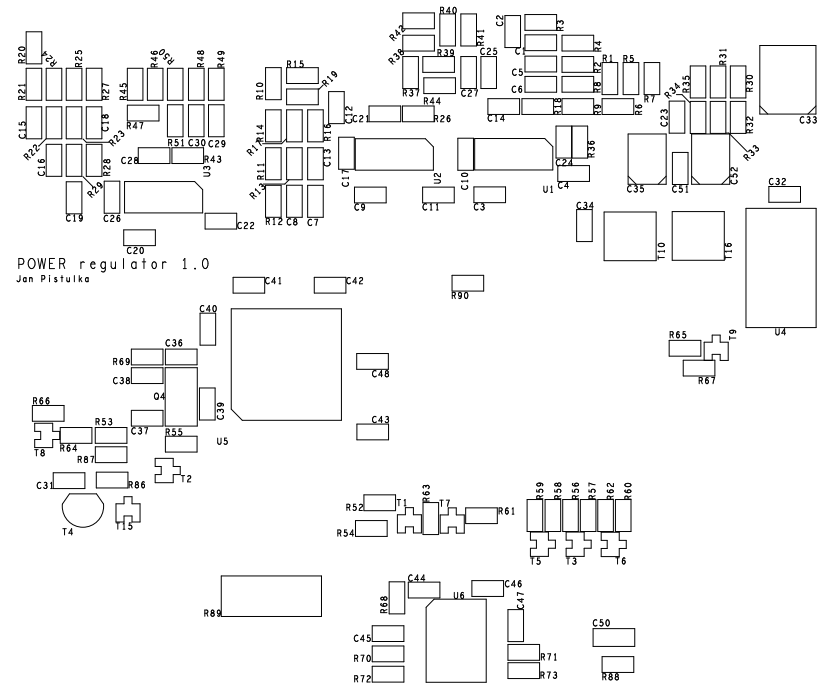
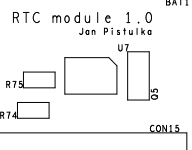
13. Přílohy



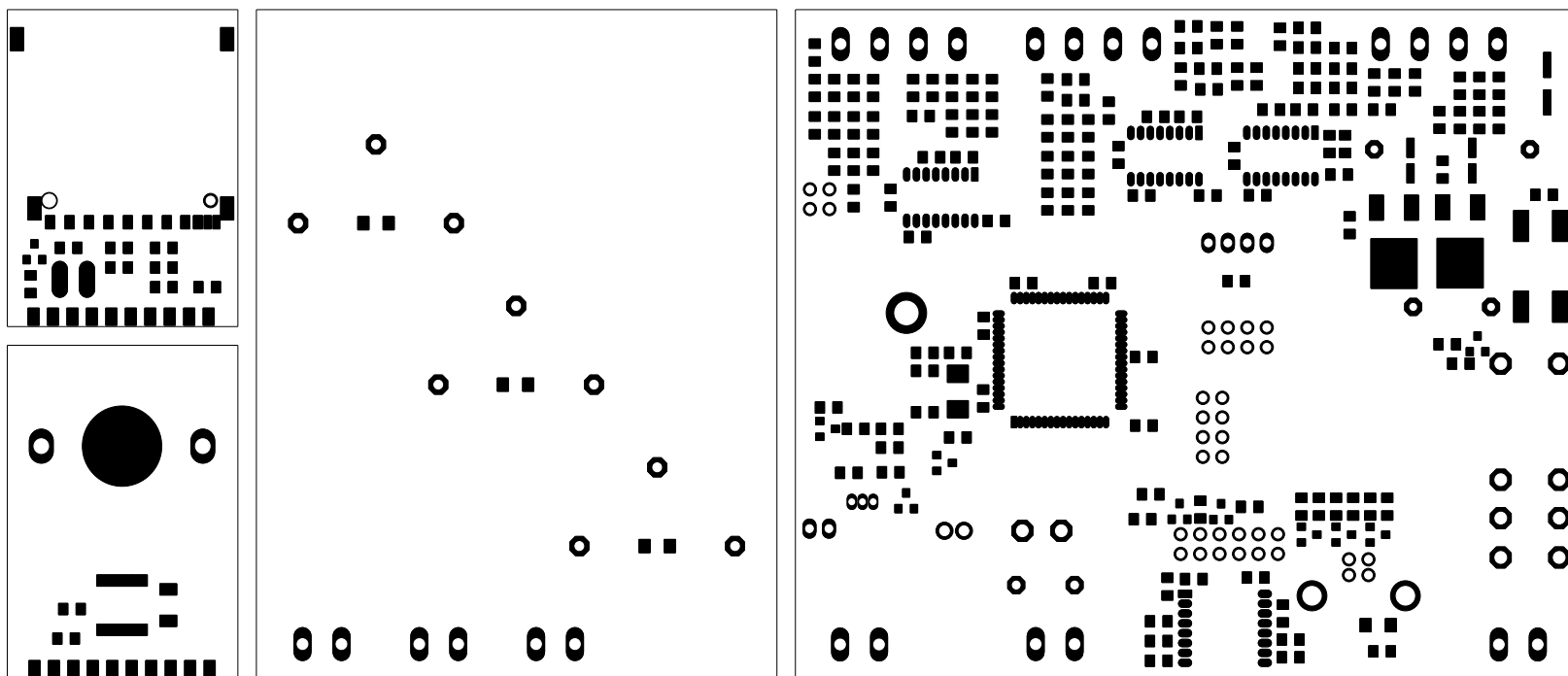
Obr. 46 – DPS – rozměry



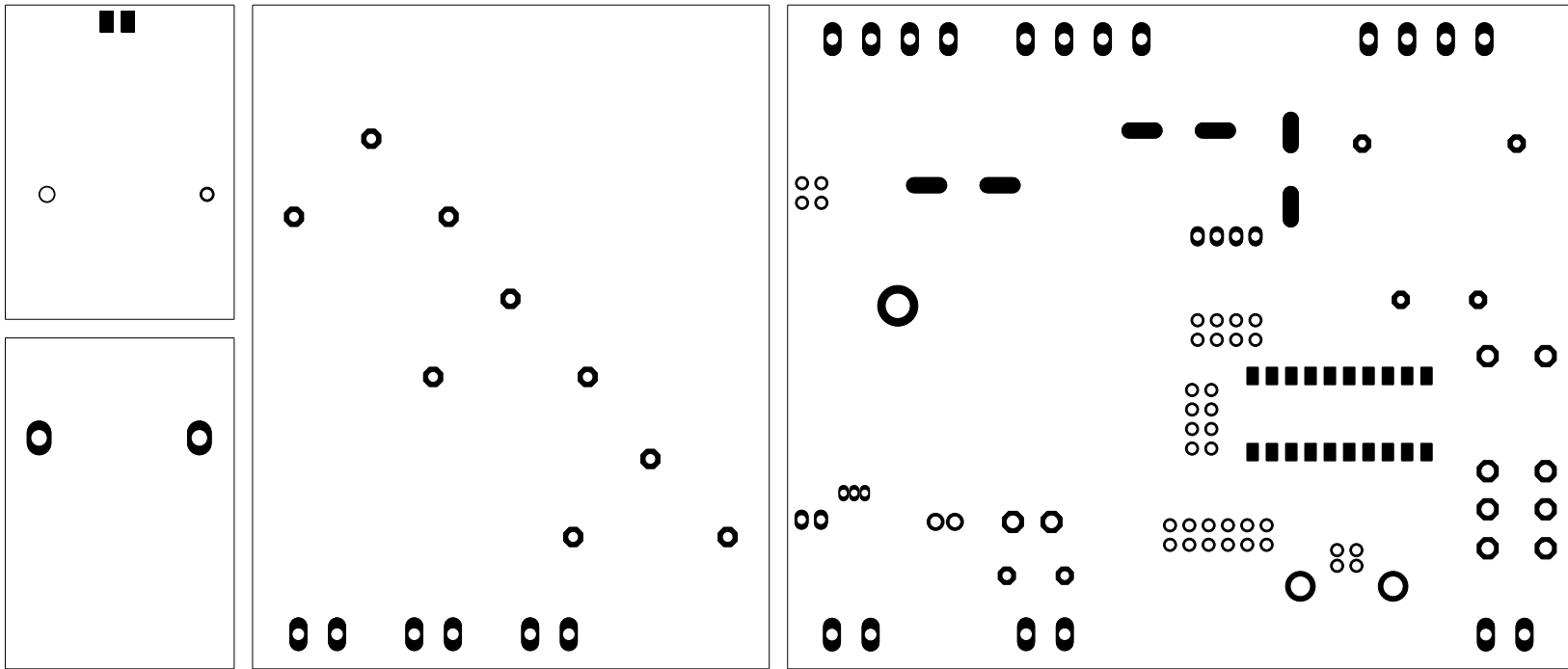
MEASURE module 1.0
Jan Pistulka



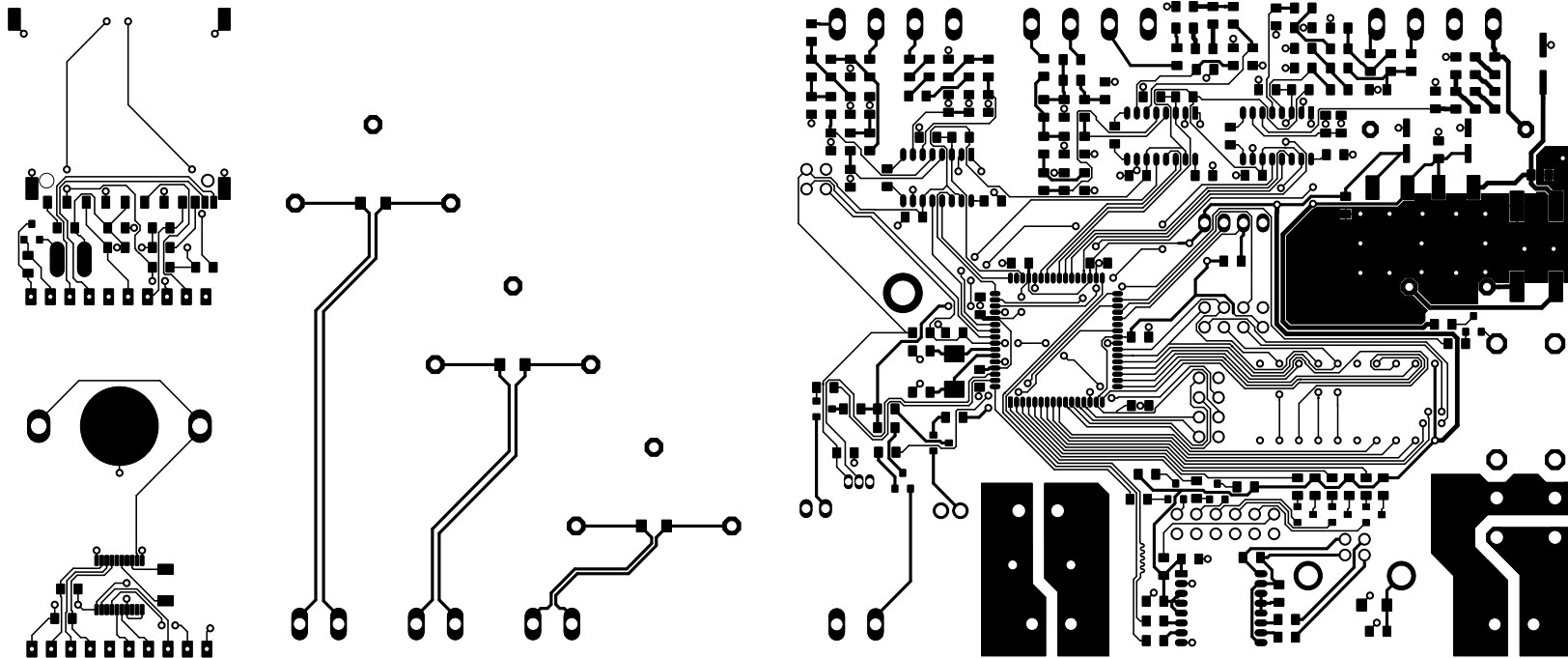
Obr. 47 – DPS - servisní potisk Bottom



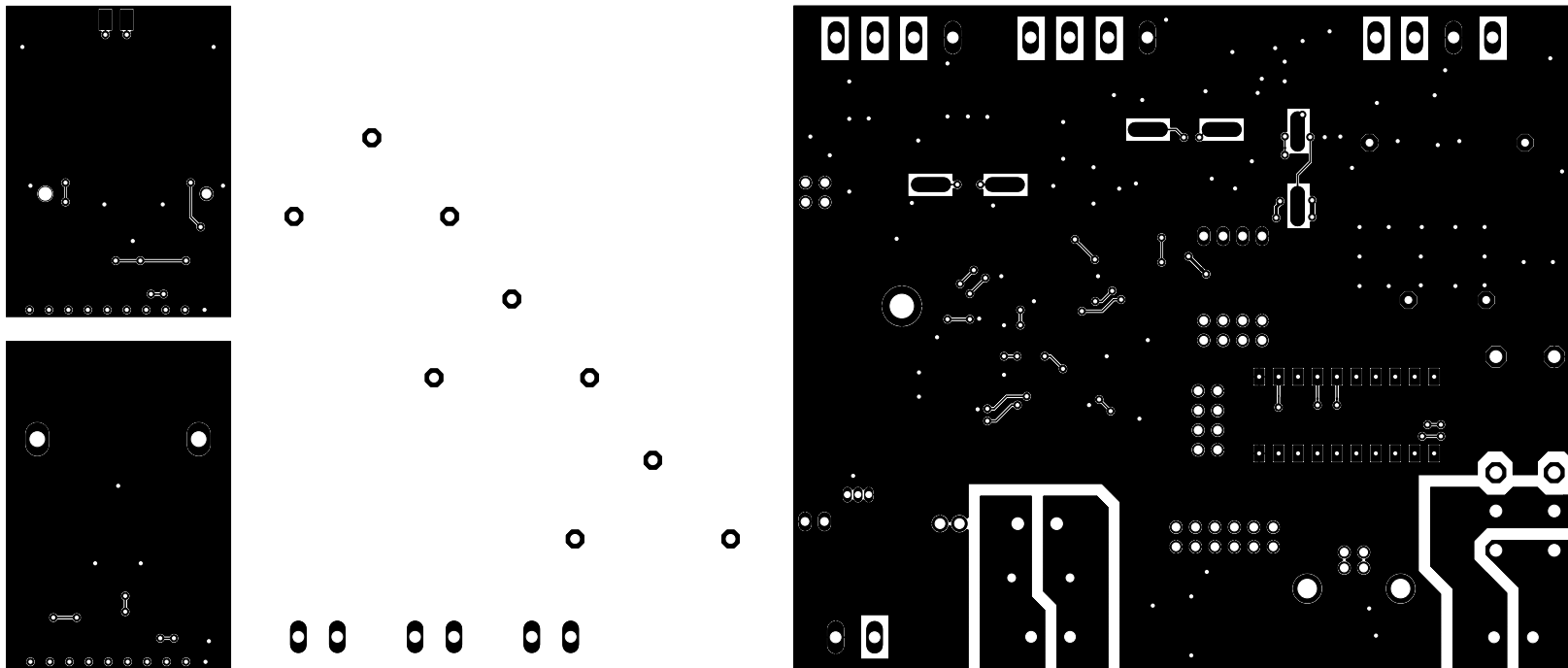
Obr. 48 – DPS - solder mask bottom



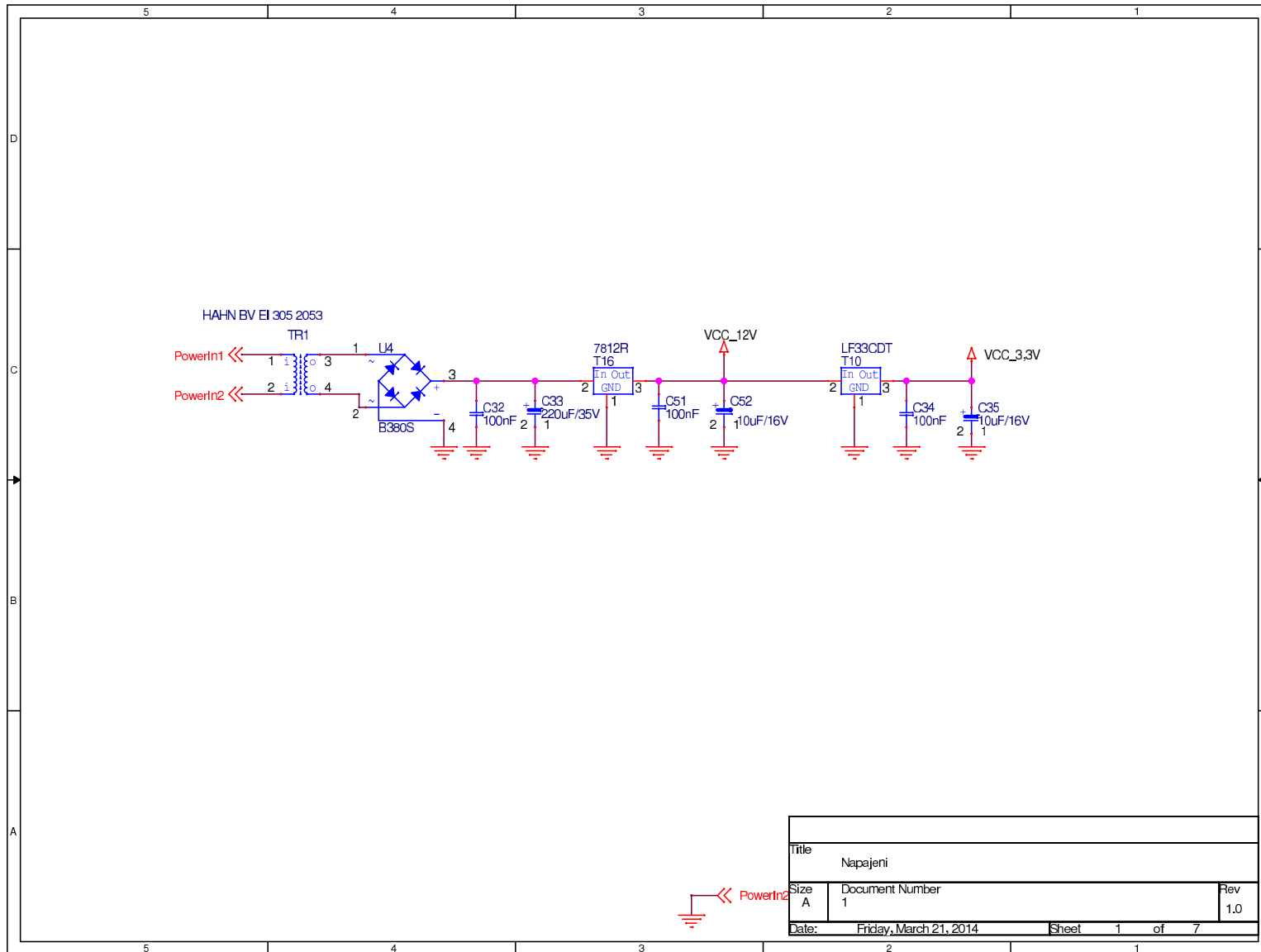
Obr. 49 – DPS - solder mask top



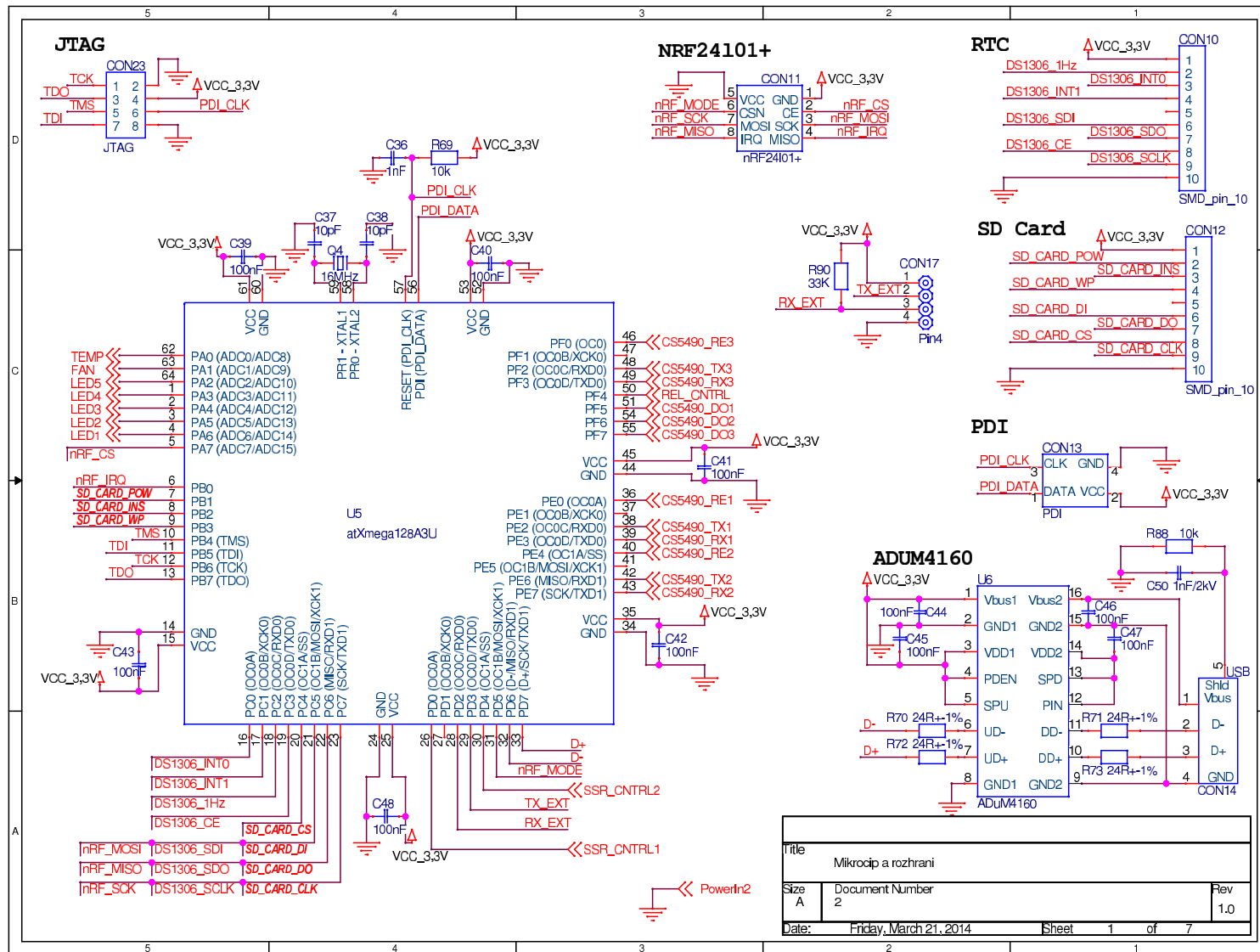
Obr. 50 – DPS - vrstva Bottom



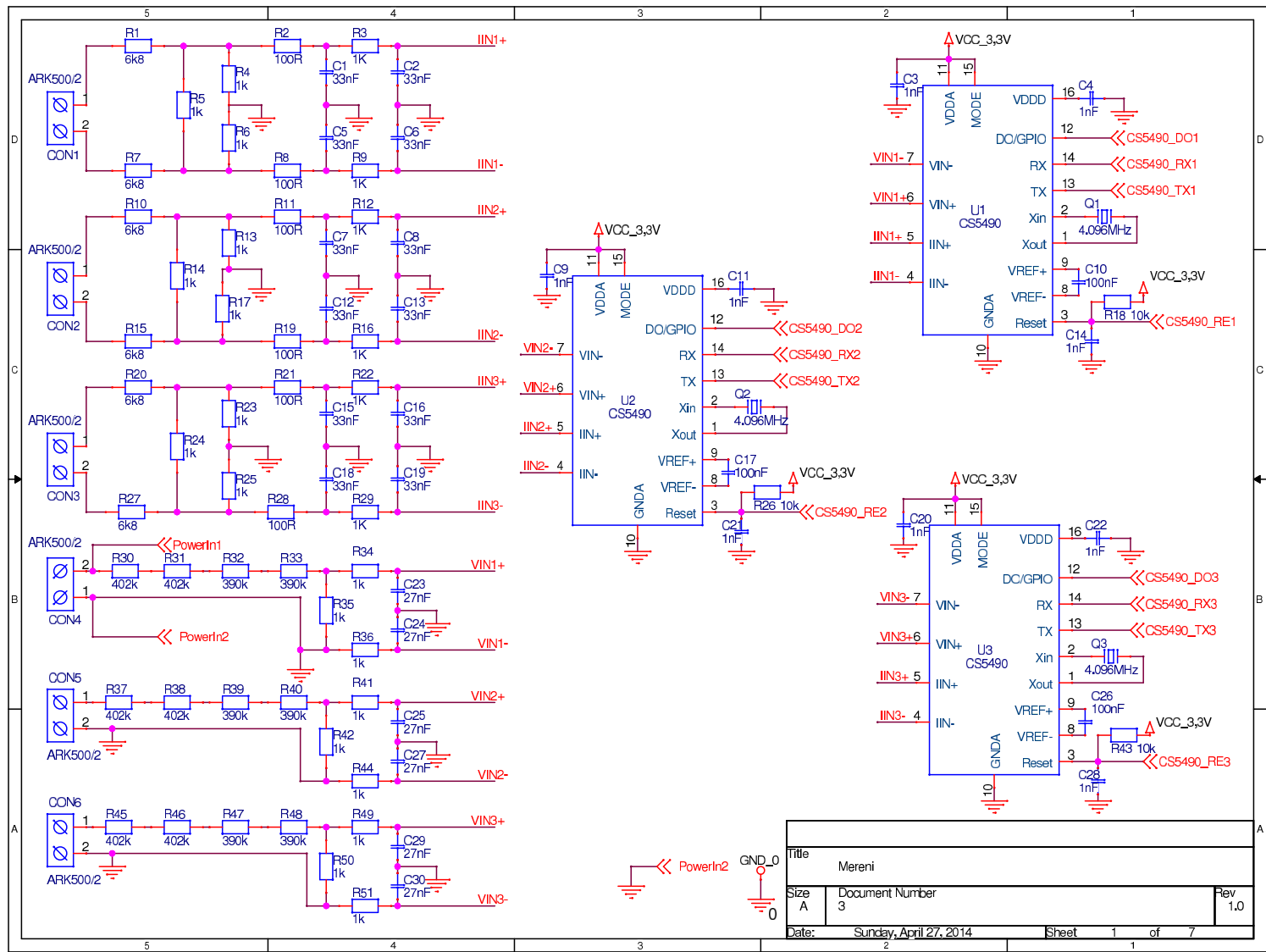
Obr. 51 – DPS - vrstva Top



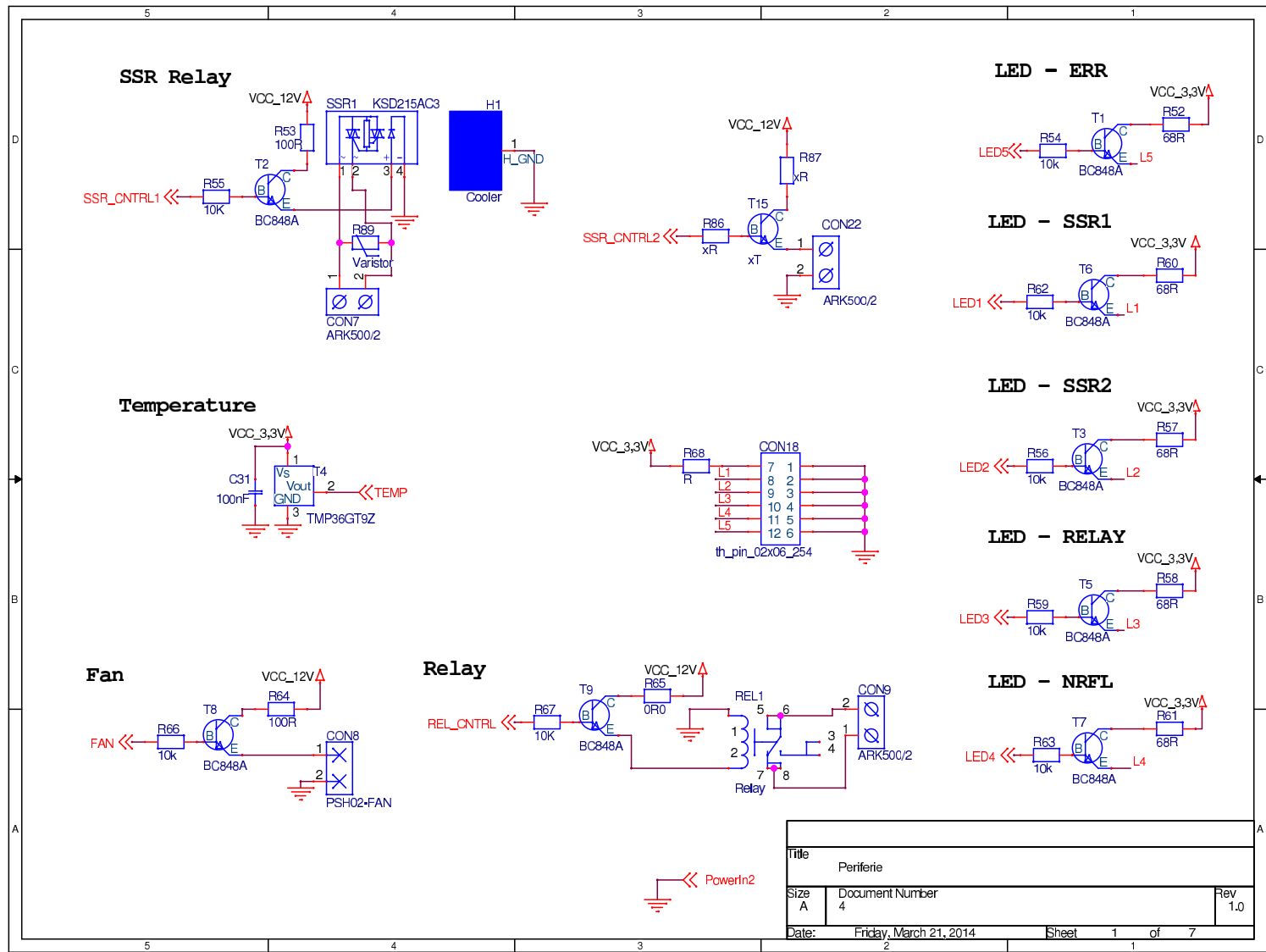
Obr. 52 – Schéma zapojení napájení



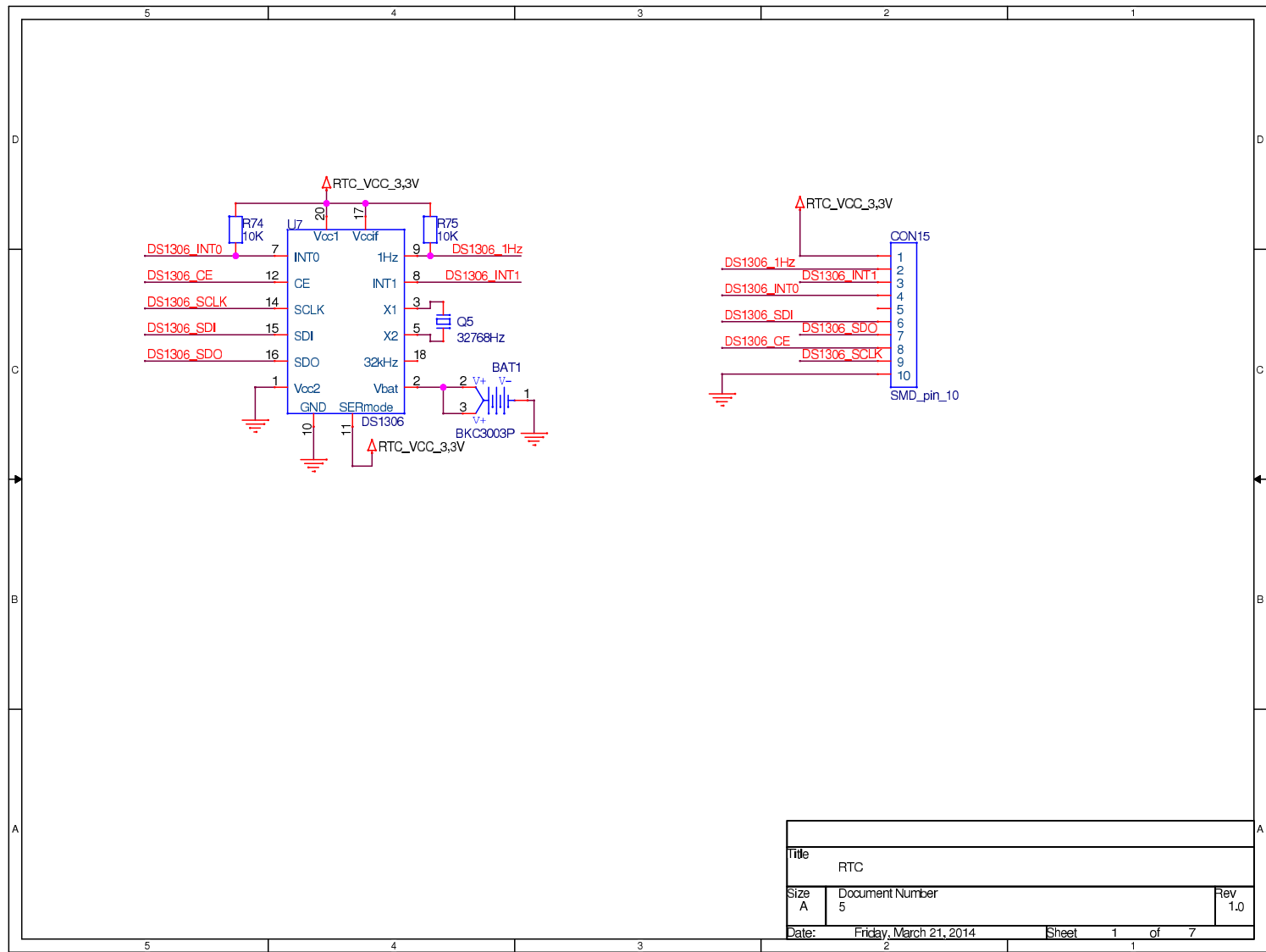
Obr. 53 – Schéma zapojení mikroprocesoru a rozhraní



Obr. 54 – Schéma zapojení měření

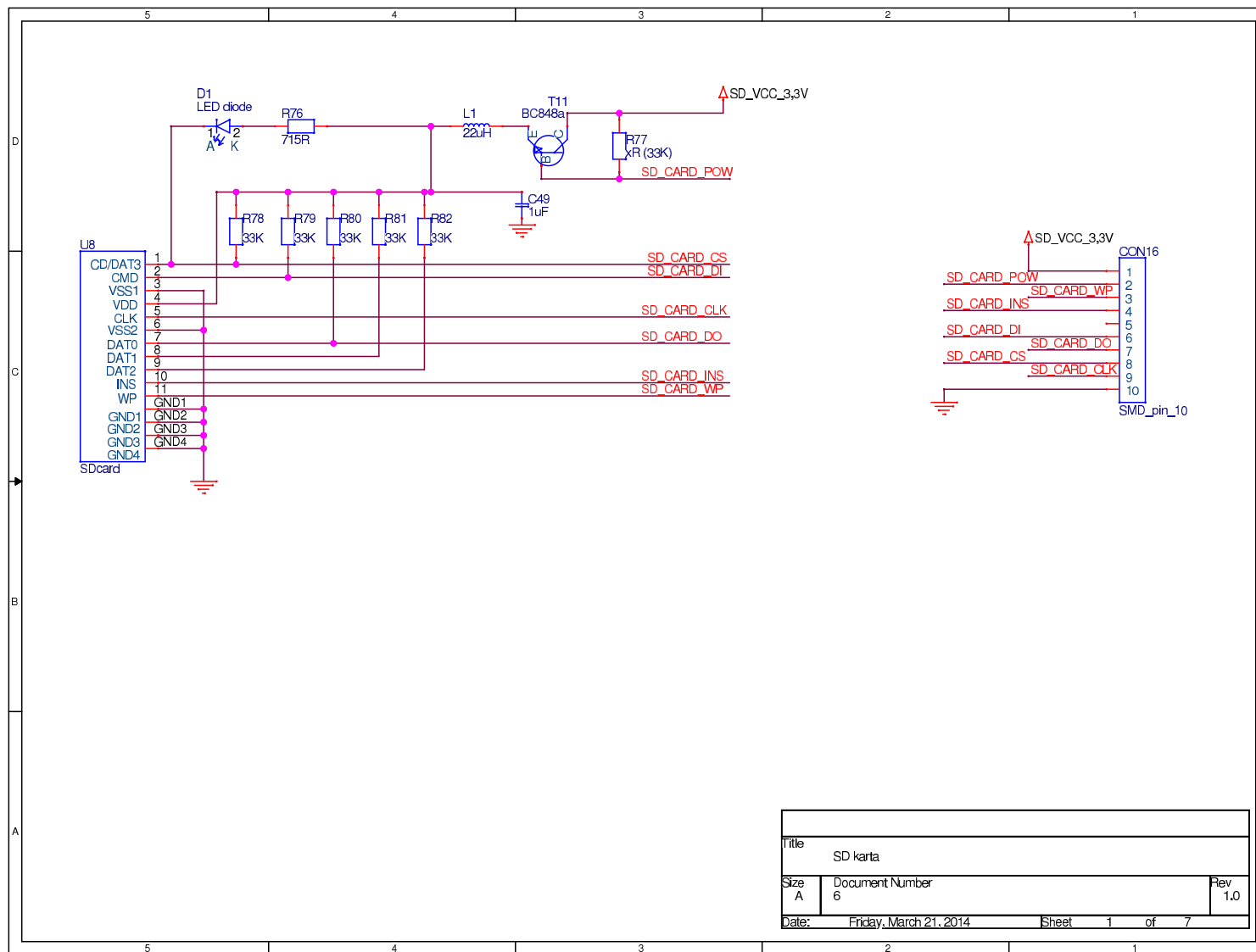


Obr. 55 – Schéma zapojení periferií



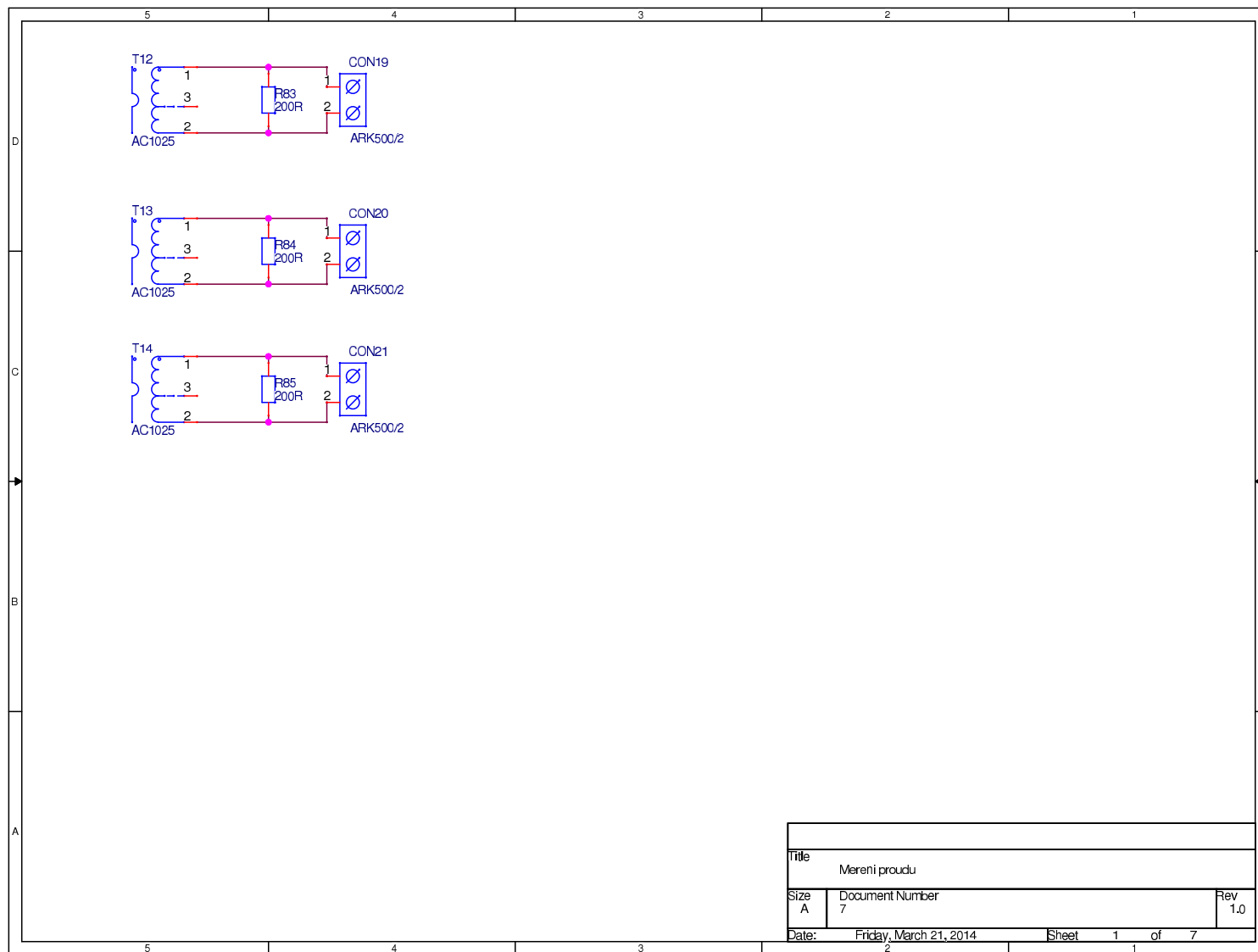
Title		
RTC		
Size	Document Number	Rev
A	5	1.0
Date:	Friday, March 21, 2014	Sheet 1 of 7

Obr. 56 – Schéma zapojení RTC



Title		
SD karta		
Size	Document Number	Rev
A	6	1.0
Date:	Friday, March 21, 2014	Sheet 1 of 7

Obr. 57 – Schéma zapojení SD karty



Title		
Merení proudu		
Size	Document Number	Rev
A	7	1.0
Date:	Friday, March 21, 2014	Sheet 1 of 7

Obr. 58 – Schéma zapojení proudových transformátorů

14. Seznam obrázků

Obr. 1 - Příklad zapojení FVE na rodinném domě	6
Obr. 2 - Rozdělení střídačů	7
Obr. 3 – Mapa trvání slunečního svitu v ČR	9
Obr. 4 - Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR (W/m ²)	10
Obr. 5 - Průměrný roční úhrn slunečního záření pro jednotlivé měsíce	10
Obr. 6 - Vliv oblačnosti na sluneční záření.....	11
Obr. 7 - Vliv orientace sklonu modulů na celkový energetický výnos	11
Obr. 8 - Počet FVE v ČR	12
Obr. 9 - Instalovaný výkon FVE v ČR.....	13
Obr. 10 - Ukázka spínání synchronního a asynchronního SSR	19
Obr. 11 - Příklad uvádění velikostí chladičů pro různé zatěžovací proudy pro SSR Sharp S216S02.....	20
Obr. 12 - Blokové schéma.....	22
Obr. 13 – Ukázka části napájecího zdroje	25
Obr. 14 - Zapojení mikroprocesoru	26
Obr. 15 - Oddělovač USB.....	27
Obr. 16 - Zapojení měřicího čipu CS5490.....	27
Obr. 17 - Napěťový kanál pro měření 3. fáze.....	28
Obr. 18 - Proudový kanál pro měření 3. fáze	28
Obr. 19 - Zapojení RTC	29
Obr. 20 - Zapojení SD karty	30
Obr. 21 - Schéma SSR a rozhraní pro externí SSR	30
Obr. 22 - Teplotní senzor.....	31
Obr. 23 – Schéma zapojení elektromagnetického relé	31
Obr. 24 – Závislost velikosti plochy v cm ² na teplotním odporu pro 4 různé úpravy hliníku (duralu).....	33
Obr. 25 - Ověření chlazení SSR (s ventilátorem).....	35
Obr. 26 - Ověření chlazení (bez ventilátoru)	36
Obr. 27 - Diferenční pár USB	37
Obr. 28 - Diferenční páry proudových transformátorů	37
Obr. 29 - Maximální proudové zatížení vodiče v závislosti na jeho průřezu a teplotním nárůstu.....	38
Obr. 30 - Izolační vzdálenosti pro DPS podle pracovního napětí	39
Obr. 31 – Omezení fázové kompenzace.....	43
Obr. 32 - Ukázka komunikace při kalibraci (čtení baud rate)	44
Obr. 33 - Vývojový diagram 1 - Start systému	46
Obr. 34 - Vývojový diagram 2 - Hlavní kalibrační smyčka	47
Obr. 35 - Vývojový diagram 3 - AC offset kalibrace	48
Obr. 36 - Vývojový diagram 4 - DC offset kalibrace	48
Obr. 37 - Vývojový diagram 5 - No load kalibrace.....	48
Obr. 38 - Vývojový diagram 6 - Fázová kalibrace	49
Obr. 39 - Vývojový diagram 7 - Měření a regulace	50
Obr. 40 - Naměřené výsledky.....	51
Obr. 41 - Obrázek řídicí jednotky odběru s výkem krabičky D6MG.....	52
Obr. 42 - Příklad externího SSR.....	53
Obr. 43 - Návrh rozšíření - dálkové spínání zásuvky	54
Obr. 44 - Návrh rozšíření - dálkové ovládání a stav systému	54

Obr. 45 - Návrh rozšíření - přístup pro PC	55
Obr. 46 – DPS – rozměry	59
Obr. 47 – DPS - servisní potisk Bottom.....	60
Obr. 48 – DPS - solder mask bottom	61
Obr. 49 – DPS - solder mask top	62
Obr. 50 – DPS - vrstva Bottom	63
Obr. 51 – DPS - vrstva Top	64
Obr. 52 – Schéma zapojení napájení.....	65
Obr. 53 – Schéma zapojení mikroprocesoru a rozhraní	66
Obr. 54 – Schéma zapojení měření	67
Obr. 55 – Schéma zapojení periférií.....	68
Obr. 56 – Schéma zapojení RTC	69
Obr. 57 – Schéma zapojení SD karty.....	70
Obr. 58 – Schéma zapojení proudových transformátorů	71

15. Seznam tabulek

Tab. 1 - Výkupní ceny a zelené bonusy FVE	8
Tab. 2 - Instalovaný výkon elektráren v ČR	14
Tab. 3 - Porovnání Elektromechanických a polovodičových relé.....	17
Tab. 4 - Důležité parametry mikročipu atXmega 128A3U.....	23
Tab. 5 - Napájecí charakteristiky jednotlivých součástek.....	24
Tab. 6 – Vlastnosti SSR relé KSD215AC3.....	32
Tab. 7 – Přizpůsobení teplotní impedance pro různé hodnoty LFM	34
Tab. 8 - Příklad registru P_{avg} , strana 16, adresa 5	45
Tab. 9 - Parametry systému	52
Tab. 10 - Charakteristika G3PE-525B.....	53

16. Popis příloh na DVD

Součástí práce je přiložený DVD-ROM s programem pro mikročip, kopií práce, datasheety a podklady pro DPS ve formátu PDF.